



Naturalis

Repositorio Institucional

<http://naturalis.fcnym.unlp.edu.ar>

Universidad Nacional de La Plata

Facultad de Ciencias Naturales y Museo



Caracterización geológica y ambiental del área de Eldorado, provincia de Misiones : aptitud de los materiales geológicos para uso cerámico y otros alternativos

Ciccioli, Susana Elsa

Doctor en Ciencias Naturales

Dirección: Schalamuk, Isidoro B.A.

Co-dirección: Garrido, Liliana B.

Facultad de Ciencias Naturales y Museo
2017

Acceso en:

<http://naturalis.fcnym.unlp.edu.ar/id/20170804001549>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional



Naturalis

Repositorio Institucional
FCNyM - UNLP



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA
Facultad de Ciencias Naturales y Museo

TESIS DOCTORAL

CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y AMBIENTAL
DEL ÁREA DE ELDORADO, PROVINCIA DE
MISIONES. APTITUD DE LOS MATERIALES
GEOLÓGICOS PARA USO CERÁMICO Y OTROS
ALTERNATIVOS.

SUSANA ELSA CICCIOLO

Director: DR. ISIDORO B. A. SCHALAMUK
Co-directora: ING. LILIANA B. GARRIDO



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA
Facultad de Ciencias Naturales y Museo



TESIS DOCTORAL

CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y AMBIENTAL
DEL ÁREA DE ELDORADO, PROVINCIA DE
MISIONES. APTITUD DE LOS MATERIALES
GEOLÓGICOS PARA USO CERÁMICO Y OTROS
ALTERNATIVOS.



SUSANA ELSA CICCIOLO



Director: DR. ISIDORO B. A. SCHALAMUK
Co-directora: ING. LILIANA B. GARRIDO

2017

“...cierto día, descende los escalones hasta las aulas y laboratorios subterráneos y entrevé el universo fascinante de los que estudian y conocen la tierra y sus habitantes, desde el comienzo de los tiempos.”

Mario E. Teruggi
Museo de La Plata 1888-1988: una centuria de honra.

Dedico este trabajo:

*a la memoria de mi papá, por el ejemplo de superación que me dejó,
a mi mamá, que siempre me alentó y apoyó para estudiar,
y a Guille, por tanto amor y por compartir esta aventura conmigo.*

Agradecimientos

Esta tesis fue un largo camino que valió la pena recorrer. La geología de Misiones, que tanto quería y sigo queriendo comprender, con 18 años me llevó de Posadas a La Plata para estudiar la Licenciatura. Luego, años después, ya recibida y trabajando, me hizo regresar allí con el deseo de seguir estudiando. La Facultad de Ciencias Naturales y Museo me recibió nuevamente con sus puertas abiertas, a través del Instituto de Recursos Minerales (INREMI), dirigido por el Dr. Abel Schalamuk. Después de las primeras conversaciones y sin mucho protocolo, la idea de hacer un trabajo de tesis en Misiones fue aceptada. Al poco tiempo definimos la zona de estudio, el tema de trabajo y el armado del proyecto. Así conocí a la Ingeniera Liliana Garrido del Centro de Tecnología de Recursos Minerales y Cerámica (CETMIC), quién accedió a ser la Co-directora de la tesis. Abel y Liliana fueron para mí mucho más que mis Directores. Sin ellos no hubiera podido llegar hasta acá. Por eso y por todo, mi más sincero agradecimiento por tantos años de formación, trabajo, generosidad, paciencia y afecto.

También quiero agradecer a otras personas e instituciones que me ayudaron y apoyaron en las distintas etapas que tuvo la tesis: cursos de posgrado, tareas de campo, tareas de laboratorio, escritura, revisiones, en fin...

A los integrantes del INREMI, entre los que cuento profesores, colegas, compañeros de la carrera y personal de apoyo. De ellos recibí en muchas oportunidades consejos útiles bibliografía, comentarios y tantas otras cosas. Quiero agradecer especialmente a Juan Carlos Gómez, quien me introdujo en el mundo de la cartografía digital y el procesamiento de imágenes. A Ricardo (Pato), Raúl, Horacio, Miguel, Daniela, Mabel, María José, Marijo y Marcela, por la ayuda o palabras de aliento que en algún momento me dieron. A mis queridas amigas, Marcela Curci, que tantas veces me alojó en su casa; a Ceci Cábana, por los momentos compartidos; y a Silvia Carrasquero, con quien hace algunos años trabajamos una hermosa amistad, entre volcanes y empanadas salteñas.

A los investigadores y docentes del CETMIC, por todas las facilidades y ayuda que me proporcionaron para realizar las tareas de laboratorio, siempre en un ambiente de trabajo ameno y cordial.

Al Dr. Angelo De Min del Dipartimento di Scienze della Terra, Università Degli Studi di Trieste, por la realización de los análisis químicos.

A Fausto Peddis del DICMA (Dipartimento Ingegneria Chimica Materiali Ambiente) de la Universidad de Bologna, por su predisposición y generosidad para compartir sus conocimientos y experiencia en rocas ornamentales.

A mis compañeros de pasantía en Bologna, Noé Carmona Leal, que cálidamente me brindó un lugar en su casa, y a Javier Eduardo Becerra, con quién pasamos momentos inolvidables en Italia y Brasil.

A Marcela Remesal del Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires (UBA), por su ayuda con la descripción de los cortes delgados de los basaltos de Eldorado y por los conocimientos petrográficos que me transmitió.

A la Dirección Provincial de Vialidad de la Provincia de Misiones, lugar donde trabajo, por la autorización para realizar esta tesis y por los permisos y licencias especiales que me concedieron para el desarrollo de la misma. Agradezco en particular a las autoridades y jefes de las distintas gestiones, y a los compañeros de los Departamentos IVET (Investigaciones Viales y Ensayos Tecnológicos), Planificación e Ingeniería Vial y Construcciones, por los valiosos conocimientos y experiencias que compartieron conmigo sobre el uso vial de las rocas basálticas en Misiones. Mención especial merecen los ingenieros Néstor Siviero y José Escobar por todo el apoyo que me brindaron, y mi compañero de ruta Florencio Orestes, incansable conductor, con quien hace años recorro los caminos y canteras de la provincia.

A los ingenieros Juan Biagini (JCR SA), Claudio Genovesio (JCR SA), Luis Collazo (BORCOM SA) y Claudio Kostaschi (IECSA SA), por estar siempre dispuestos a responder todo tipo de inquietudes y preguntas sobre la explotación de canteras y la producción de áridos basálticos en general.

A Eliseo Christiansen de la Cantera Eldorado y a los propietarios de la Canteras Behar, Freyer y Vock, por permitirme realizar los muestreos y recibirme, una y otra vez, para trabajar en los frentes de sus explotaciones.

A la Dirección General de Geología y Minería de la provincia, por la información proporcionada, en especial a su director Rogelio Schaller y a los colegas Pepe Portaneri, Fenelón Ávila y Fernando Crivelo.

A Juan Solari y a Lucas Russo del Ministerio de Ecología y Recursos Naturales Renovables, por su valiosa ayuda con los antecedentes cartográficos de la Provincia.

A Enrique Santi, propietario de la Marmolería Santi, por la preparación de las probetas para los ensayos ornamentales y a Roberto Gutawski de la localidad de Oberá, por las muestras cedidas para este trabajo.

A los profesores María Elena Almirón y Rubén Gastaldo de la Facultad de Artes de la UNaM, por la información proporcionada sobre el uso del *barro ñau* en cerámica artística y por las muestras facilitadas para este estudio.

A Griselda Ferreyra, por su ayuda, apoyo incondicional y sinceridad en todo momento.

A Susana Elsa Kümmlitz, *teacher* y sobre todo buena amiga que supo apasionarse con los basaltos de Paraná-Etendeka.

A los entrañables amigos platenses Sandra, Sergio, Claudia, Eleo, *Gancedos*, que siempre me recibieron con las puertas abiertas de sus casas y familias.

A mi familia que me apoyó en los buenos y malos momentos. A todos, muchas gracias.

Resumen

En esta tesis se presentan los estudios realizados con el propósito de contribuir al conocimiento geológico de un sector del territorio de la provincia de Misiones, principalmente de los basaltos de la Formación Serra Geral (FSG), expuestos en el área de Eldorado; en relación con el interés de establecer la aptitud de uso de estos materiales en aplicaciones cerámicas y otras alternativas.

Los basaltos de la FSG fueron caracterizados a través de análisis petrográficos y geoquímicos y según la clasificación de magmas tipo propuesta por Peate *et al.* (1992), para la Provincia Ígnea de Paraná. Las rocas analizadas son basaltos tholeíuticos, salvo una que corresponde a un dique andesítico basáltico. Todas pertenecen al grupo de alto Ti/Y (>310) conformado por los magmas Urubici, Pitanga, Paranapanema y Ribeira. Los tipos Gramado y Esmeralda (bajo Ti/Y) no fueron hallados en el muestreo realizado. Los criterios dados por la clasificación (contenidos de TiO_2 , Sr, Zr/Y y otros), permitieron reconocer diferencias entre los basaltos aflorantes en el sector centro-oeste de la zona y los expuestos en el borde este de la misma. En el primer caso, las muestras resultaron compatibles con el tipo Paranapanema y en el segundo, con la variedad Ribeira. Con respecto a las características mineralógicas y petrográficas, los basaltos densos o masivos mostraron similitudes en cuanto a los minerales primarios y a los rasgos texturales. Las diferencias halladas fueron observadas en la mineralogía secundaria y relacionadas con la posición de las muestras en los derrames (niveles de tope, centro, base) y con el perfil de meteorización. A partir de estas determinaciones se seleccionó una muestra para los ensayos tecnológicos (CELD 004), un basalto masivo, extraído de la parte media de una colada, de grano fino y textura intergranular. Esta muestra fue considerada representativa de los niveles densos y más frescos colectados en la zona de trabajo.

El objetivo de los estudios tecnológicos fue evaluar la aptitud de los basaltos para su utilización como materia prima para la fabricación de cerámica roja, como componte no plástico o material de relleno “filler”. Para ello se utilizaron tres muestras, una roca procedente de la zona de estudio (CELD 004) y dos residuos finos colectados en una planta vial (RFT y RFA). Estos últimos fueron incluidos en las pruebas de aptitud con el propósito de comparar su desempeño en relación con los basaltos molidos en el laboratorio. Como componentes plásticos se emplearon dos materiales arcillosos locales (SO y SR5), conocidos en la región como “ñau”. La decisión de usar ñau para los estudios cerámicos responde asimismo a la intención de procurar un aprovechamiento integral de los recursos geológicos de la provincia. Los resultados obtenidos mostraron la aptitud del basalto CELD 004 para mejorar las características cerámicas de las piezas preparadas con SO y SR5, habiéndose establecido un contenido adecuado de 40-60% para una condición de sinterización de 950-1000° C, usual en la fabricación de cerámica roja estructural, y que ciertamente dependerá del material arcilloso utilizado. Las composiciones con los residuos recuperados (RFT y RFA) originaron resultados similares, por lo que se estableció su aptitud para sustituir al basalto CELD 004 en las diferentes formulaciones.

Adicionalmente se efectuaron ensayos básicos para usos ornamentales. Para ello se utilizaron dos basaltos de la FSG procedentes de la zona de estudio y de la localidad de Oberá, respectivamente. La caracterización básica de estas rocas se realizó por microscopía óptica a través de la descripción de cortes delgados y análisis químicos de elementos mayoritarios. La caracterización tecnológica de ambos basaltos incluyó la realización de ensayos físicos, mecánicos y de alterabilidad. El nivel de caracterización alcanzado en este trabajo permitió establecer que los basaltos estudiados tienen rangos de absorción y porosidad aceptables, buenos valores de resistencia a la compresión y a la flexión, así como también, resistencia al ataque de los agentes químicos ensayados. No obstante, los valores obtenidos de resistencia a la abrasión se consideran relativamente bajos para, por ejemplo, revestimientos de pisos. Las propiedades mecánicas del basalto de Eldorado indican mejores aptitudes que el de Oberá, lo que se atribuye a las diferencias texturales y mineralógicas que presentan estas rocas. Se considera que ambas variedades poseen cualidades estéticas aceptables por lo que, con la aplicación de metodologías y tecnologías adecuadas para su explotación y, fundamentalmente, con el diseño de productos adaptados a sus posibilidades de procesamiento, podrían tener novedosas oportunidades en el campo ornamental.

Finalmente, junto con la caracterización geológica y los estudios para aplicaciones alternativas, se incluyó una caracterización ambiental de la zona de estudio. Esta caracterización tuvo por objetivo contextualizar a la minería del basalto en relación con el medio en el cual se desarrolla, considerando sus principales impactos así como también las restricciones o limitaciones dadas por la normativa vigente.

Abstract

This thesis presents the studies carried out with the purpose of contributing to the geological knowledge of an area of the province of Misiones, mainly the basalts of the Serra Geral Formation (SGF), exposed in the area of Eldorado, related to the interest of establishing the aptitude for utilization of these materials in ceramic applications and other alternatives.

The basalts of the SGF were characterized through petrographic and geochemical analysis and according to the classification of magma type proposed by Peate *et al.* (1992), for the Igneous Province of Paraná. The analysed rocks are tholeiitic basalts, except for one that belongs to a basaltic andesitic dike. They all belong to the group of high Ti/Y (>310) conformed: by the magmas Urubici, Pitanga, Paranapanema and Ribeira. The Gramado and Esmeralda types (low Ti/Y) were not found in the sample collection carried out. The criteria given to the classification (contents of TiO_2 , Sr, Zr/Y and others) allowed us to recognize the differences between basalt outcrops in the west-centre section of the area and the ones exposed in its east coast. In the first case, the samples were compatible with the Paranapanema type whereas in the second case, they were compatible with the Ribeira variety. As regards the mineralogical and petrographic characteristics, dense or massive basalts showed similarities in primary minerals and textural features. The differences found were observed in the secondary mineralogy and related to the position of the samples in the flows (top, centre and base level) and with a weathering profile. From these determinations a sample was selected for technological testing (CELD 004), a massive basalt, extracted from the middle position of a flow, with fine grain and intergranular texture. This sample was considered representative of the densest and freshest levels collected in the working area.

The objective of the technological testing was to evaluate the basalt aptitude to be used as prime material for the manufacturing of red ceramic as non-plastic component and filler. Three samples were used for this purpose, a rock from the study area (CELD 004) and two pieces of fine waste material collected in a road construction plant. (RFT and RFA). The last ones were included in the aptitude test in order to compare their performance in relation to the basalts ground in the laboratory. Two local clay components (SO and SR5), known as “ñaú”, were used as plastic material. The decision to use “ñaú” for ceramic studies has to do with the intention of a full use of the geological resources in the province. The results obtained showed the aptitude of basalt CELD 004 to improve the ceramic characteristics of the pieces made with SO and SR5, having established an adequate content of 40-60% for a sintering condition of 950-1000°C, usual in the manufacturing of red structural ceramic, and which will certainly depend on the clay material used. The composition with the recovered waste material (RFT and RFA) originated similar results, on which its aptitude to substitute basalt CELD 004 was established in the different formulations.

Additional basic tests for ornamental use were also carried out. For this purpose, two different basalts from the SGF study area and from the locality of Oberá were used respectively. The basic characterization of these rocks was made by optic microscopic observation through the description of fine cuts and the chemical analysis of major elements. The technological characterization of both basalts included physical and mechanical as well as alterability tests. The level of characterization reached in this work established that the studied basalts have acceptable absorption and porosity ranks, good compression resistance and flexion levels, as well as resistance to the attack of the testing chemical elements. Nevertheless, the values obtained in abrasion resistance are considered relatively low, for example, for floor tilling. The mechanic properties of the basalt from Eldorado indicates better aptitudes than that from Oberá, which is attributed to the textural and mineralogical differences presented in these rocks. Both varieties are considered aesthetically acceptable, so with the appropriate methodology and technology for exploitation and mainly with the design of products adapted to the processing possibilities, they could have novel opportunities in the ornamental field.

Finally, together with the geological characterization and alternative application studies, an environmental characterization was included in the study area. This characterization aimed at contextualizing basalt mining in relation to the area in which it is developed, considering its main impacts as well as the restrictions and limitations according to the current regulations.

Contenido

| | |
|---|-----|
| Agradecimientos | i |
| Resumen | iii |
| Abstract | v |
| Lista de Abreviaturas | x |
| Lista de Figuras | xi |
| Lista de Cuadros | xiv |
| CAPÍTULO 1 | 2 |
| Presentación y objetivos de la tesis | 2 |
| Organización de la tesis | 4 |
| Ubicación del área de estudio | 5 |
| CAPÍTULO 2 | 10 |
| Introducción | 10 |
| Marco regional | 11 |
| Antecedentes | 11 |
| Extensión y edad del magmatismo | 12 |
| Diferencias petrológicas y geoquímicas regionales | 14 |
| Geología física de los derrames de la Formación Serra Geral | 19 |
| Geología local | 22 |
| Antecedentes de estudios geológicos en Misiones | 22 |
| Materiales y métodos | 25 |
| Búsqueda bibliográfica | 25 |
| Procesamiento digital de antecedentes cartográficos y utilización de imágenes satelitales | 25 |
| Trabajo de campo | 26 |
| Estudios y análisis de laboratorio | 30 |
| Resultados | 30 |
| Características de los afloramientos seleccionados | 31 |
| Características petrográficas y mineralógicas de las muestras colectadas | 39 |
| Características Geoquímicas | 42 |
| CAPÍTULO 3 | 49 |
| Introducción | 49 |
| Definición, clasificación y características generales de las rocas basálticas | 50 |
| Usos de las rocas basálticas | 53 |
| Áridos | 53 |
| Otras aplicaciones industriales | 55 |

| | |
|--|-----|
| Aplicaciones ornamentales..... | 61 |
| Enmiendas minerales | 64 |
| Estudios de aptitud para uso cerámico | 65 |
| Materiales y métodos | 65 |
| Materias primas | 65 |
| Caracterización de las materias primas | 65 |
| Preparación de probetas, secado y calcinación | 67 |
| Caracterización de las probetas calcinadas | 68 |
| Resultados y discusión | 70 |
| Caracterización de los basaltos empleados | 70 |
| Caracterización de los materiales arcillosos utilizados | 73 |
| Propiedades cerámicas de los materiales arcillosos SO y SR5 (sin adición de basalto) y a distintas temperaturas de calcinación | 77 |
| Efecto de la adición de basalto en las propiedades de los cerámicos obtenidos | 78 |
| Efecto de la adición de basalto sobre las propiedades del producto seco..... | 79 |
| Efecto de la adición de basalto y de la temperatura sobre las propiedades cerámicas | 82 |
| Fases cristalinas presentes en las piezas calcinadas a diferentes temperaturas, con y sin adición de basalto..... | 86 |
| Variación del MOR de las piezas calcinadas con las diferentes adiciones de basalto | 89 |
| Efecto de la adición de residuos finos recuperados de una planta vial sobre las propiedades cerámicas..... | 90 |
| Estudios de aptitud para uso ornamental | 95 |
| Materiales y métodos | 95 |
| Resultados y discusión | 96 |
| Petrografía | 96 |
| Ensayos Tecnológicos..... | 97 |
| CAPÍTULO 4 | 101 |
| Introducción | 101 |
| Características ambientales a nivel provincial y del área de estudio..... | 102 |
| Clima | 102 |
| Relieve..... | 104 |
| Suelos | 106 |
| Hidrología | 109 |
| Flora, fauna y áreas naturales protegidas | 111 |
| Arqueología..... | 113 |
| Aspectos socioeconómicos..... | 114 |

| | |
|---|-----|
| Población..... | 114 |
| Usos del suelo | 116 |
| Los impactos ambientales de la minería del basalto en Misiones. Una caracterización general. .. | 119 |
| Datos sobre la minería del basalto en Misiones | 119 |
| Los potenciales impactos de la apertura, explotación y abandono de las canteras de basalto. .. | 121 |
| Restricciones o limitantes identificadas para la minería del basalto en el área de estudio..... | 126 |
| CAPÍTULO 5 | 129 |
| Aspectos geológicos..... | 129 |
| Marco regional | 129 |
| Caracterización geológica del área de Eldorado | 131 |
| Usos de las rocas basálticas..... | 132 |
| Aptitudes cerámicas de algunos basaltos de la Formación Serra Geral | 134 |
| Aptitudes ornamentales de algunos basaltos de la Formación Serra Geral | 136 |
| Aspectos ambientales | 136 |
| Conclusiones | 137 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 139 |

Lista de Abreviaturas

| | | |
|------------|---|---|
| AA | - | Absorción de agua |
| AF | - | Afloramientos de la Formación Serra Geral en la zona de estudio |
| AP | - | Antes del Presente |
| ASTM | - | American Society for Testing Materials |
| ATD-TG | - | Análisis Térmico Diferencial – Termogravimétrico |
| BB | - | Brechas Basálticas |
| BM | - | Basaltos masivos |
| BVA | - | Basaltos vesículo – amigdalares |
| C.A.R.T.A. | - | Compañía Argentina de Relevamientos Topográficos y Aerofotogramétricos. |
| CFB | - | Continental Flood Basalt |
| CIC | - | Capacidad de Intercambio Catiónico |
| CIGA | - | Centro de Investigación de Geología Aplicada |
| CIRSOC | - | Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles |
| CPC | - | Cuenca del Paraná Central |
| CPE | - | Cono Pirométrico Equivalente |
| CPN | - | Cuenca del Paraná Norte |
| CPS | - | Cuenca del Paraná Sur |
| D | - | Densidad aparente |
| DEM | - | Modelo digital de Elevación |
| DNV | - | Dirección Nacional de Vialidad |
| DR | - | Densidad relativa |
| DRX | - | Difracción de Rayos X |
| DT | - | Densidad teórica |
| EGP | - | Elementos del Grupo del Platino |
| FA | - | Ferrocarriles Argentinos |
| FSG | - | Formación Serra Geral |
| HTi | - | Titanio alto |
| ICP/AES | - | Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy |
| IDE | - | Infraestructura de Datos Espaciales |
| IGN | - | Instituto Geográfico Nacional |
| IPEC | - | Instituto Provincial de Estadísticas y Censos |
| IRAM | - | Instituto Argentino de Normalización Y Certificación |
| ITi | - | Titanio Intermedio |
| LIP | - | Large Igneous Province |
| LTi | - | Titanio bajo |
| MEyRNR | - | Ministerio de Ecología y Recursos Naturales Renovables (Misiones) |
| MOR | - | Módulo de Rotura |
| P | - | Porosidad aparente o abierta |
| PE | - | Perfiles |
| PT | - | Porosidad total |
| RAS | - | Reacción Álcali – Sílice |
| RETECI | - | Relevamiento Territorial de Comunidades Indígenas |
| SAG | - | Sistema Acuífero Guaraní |
| SEGEMAR | - | Servicio Geológico Minero Argentino |
| SIGel | - | Sistema de Información Geográfico de Eldorado |
| SMN | - | Servicio Meteorológico Nacional |

| | | |
|-----|---|--------------------------------|
| T | - | Tamiz |
| V | - | Volumen aparente |
| VN | - | Vialidad Nacional |
| ZAH | - | Zona Agroeconómica Homogénea |
| ZVH | - | Zonas Vesiculares Horizontales |

Lista de Figuras

| | N° Pág. |
|-------------|--|
| Figura 1.1 | Ubicación de la zona de estudio. |
| Figura 1.2 | La zona de estudio representada a través de un modelo digital de elevación (DEM). |
| Figura 2.1 | Gran Provincia Ígnea Paraná – Etendeka. |
| Figura 2.2 | Duración del volcanismo de Paraná. |
| Figura 2.3 | Mapa esquemático de la cuenca del Paraná donde se indican los sectores establecidos por Piccirillo <i>et al.</i> (1988c). |
| Figura 2.4 | Mapa esquemático donde se indican los resultados de las muestras analizadas por Peate <i>et al.</i> (1992) correspondientes al territorio de la Provincia de Misiones. |
| Figura 2.5 | Estadios del emplazamiento de un flujo pahoehoe inflado. |
| Figura 2.6 | Bosquejo geológico del trabajo de C.A.R.T.A. (1964). |
| Figura 2.7 | Perfil PE-1. |
| Figura 2.8 | Perfil PE-1. |
| Figura 2.9 | Perfil PE-1. |
| Figura 2.10 | Perfiles PE-5 y PE-3. |
| Figura 2.11 | Ubicación de los puntos relevados durante el trabajo de campo. |
| Figura 2.12 | Rasgos estructurales. |
| Figura 2.13 | Fotomicrografías de cortes y pulidos. |
| Figura 2.14 | Clasificación de las rocas ígneas de la zona de Eldorado de acuerdo al diagrama TAS (Le Bas <i>et al.</i> 1986). |
| Figura 2.15 | Diagrama de discriminación AFM, según Irvine y Baragar (1971). |
| Figura 2.16 | Diagrama de discriminación según Miyashiro (1974). |
| Figura 2.17 | Diagrama Ti/Y vs. Ti/Zr según Peate (1997). |
| Figura 2.18 | Diagrama Sr vs. Zr/Y según los criterios de Peate <i>et al.</i> (1992). |
| Figura 2.19 | Diagrama TiO ₂ vs. Sr de discriminación de magmas tipo de acuerdo a los criterios definidos por Peate <i>et al.</i> (1992). |
| Figura 3.1 | Diagrama de clasificación modal QAPF de rocas volcánicas (basado en Streckeisen 1978). |
| Figura 3.2 | Diagrama TAS (álcalis totales vs. sílice) utilizado para la clasificación química de rocas volcánicas, basado en Le Bas <i>et al.</i> (1986). |
| Figura 3.3 | Productos de la firma EUTIT S.R.O. (Rep. Checa) fabricados a partir de la fusión y moldeo de rocas basálticas (cast fused basalt). |
| Figura 3.4 | Usos ornamentales de rocas basálticas de la FSG. |
| Figura 3.5 | Materias primas. |
| Figura 3.6 | Preparación de probetas. |
| Figura 3.7 | Esquema de trabajo de los estudios cerámicos. |
| Figura 3.8 | Sección delgada de la muestra CELD 004 con analizador. |

| | Nº Pág. |
|-------------|--|
| Figura 3.9 | DRX del basalto utilizado CELD 004 y de los residuos basálticos RFT y RFA. |
| | 72 |
| Figura 3.10 | Comparación de las curvas de distribución de tamaño de partículas para las tres muestras de basalto. |
| | 72 |
| Figura 3.11 | DRX de los materiales arcillosos SO y SR5. Muestra total (condición desorientada). |
| | 73 |
| Figura 3.12 | DRX de la muestra SR5. Fracción <2 µm (seca, calcinada y glicolada). |
| | 73 |
| Figura 3.13 | DRX de la muestra SO. Fracción <2 µm (seca, calcinada y glicolada). |
| | 74 |
| Figura 3.14 | ATD-TG de los materiales arcillosos. |
| | 75 |
| Figura 3.15 | Distribución de tamaño de partículas de los materiales SR5 y SO. |
| | 76 |
| Figura 3.16 | Clasificación de tamaño de partículas de SO y SR5 en el diagrama ternario de Winkler (1954). |
| | 77 |
| Figura 3.17 | Propiedades cerámicas de las piezas producidas con SO. |
| | 77 |
| Figura 3.18 | Curvas granulométricas de las diferentes formulaciones de SO y CELD 004. |
| | 78 |
| Figura 3.19 | Curvas granulométricas de las diferentes formulaciones de SR5 y CELD 004. |
| | 79 |
| Figura 3.20 | Densidad aparente de productos secos preparados con SO, SR5 y CELD 004. |
| | 79 |
| Figura 3.21 | Densidad relativa de piezas secas con SR5 y diferentes contenidos de los basaltos CELD 004, RFT y RFA. |
| | 80 |
| Figura 3.22 | Contracción por secado de piezas con SO y SR5 para diferentes contenidos de CELD 004, RFT y RFA. |
| | 81 |
| Figura 3.23 | MOR vs. Contenido de basalto para mezclas con SO – CELD 004; SR5 – CELD 004 y SR5 – RFT. |
| | 81 |
| Figura 3.24 | Contracción de las piezas con SO y diferentes contenidos de CELD 004 vs. Temperatura de sinterizado. |
| | 82 |
| Figura 3.25 | Densidad aparente de las piezas con SO y diferentes contenidos de CELD 004 vs. Temperatura de sinterizado. |
| | 83 |
| Figura 3.26 | Porosidad de las piezas con SO y diferentes contenidos de CELD 004 vs. Temperatura de sinterizado. |
| | 83 |
| Figura 3.27 | Contracción lineal de las piezas con SR5 y diferentes contenidos de CELD 004 vs. Temperatura de sinterizado. |
| | 84 |
| Figura 3.28 | Densidad aparente de las piezas con SR5 y diferentes contenidos de CELD 004 vs. Temperatura de sinterizado. |
| | 85 |
| Figura 3.29 | Porosidad de las piezas con SR5 y diferentes contenidos de CELD 004 vs. Temperatura de sinterizado. |
| | 85 |
| Figura 3.30 | DRX de las piezas con SO (sin adición de basalto) sinterizadas a distintas temperaturas. |
| | 87 |
| Figura 3.31 | DRX de las piezas con SR5 (sin adición de basalto) sinterizadas a distintas temperaturas. |
| | 87 |
| Figura 3.32 | DRX de piezas con SR5 y 20% de basalto CELD 004 a distintas temperaturas. |
| | 88 |
| Figura 3.33 | DRX de SR5 (sin adición de basalto) y con 60% de basalto (CELD 004, RFT y RFA) sinterizadas a 1000° C. |
| | 88 |
| Figura 3.34 | MOR de las piezas con SO y diferentes contenidos de CELD 004 vs. Temperatura de sinterizado. |
| | 89 |

| | N° Pág. |
|---|---------|
| Figura 3.35 MOR de las piezas con SR5 y diferentes contenidos de CELD 004 vs. Temperatura de sinterizado. | 89 |
| Figura 3.36 Densidad aparente de las piezas con SO y RFT sinterizadas a diferentes temperaturas vs. Contenido de basalto. | 90 |
| Figura 3.37 Porosidad aparente o abierta de las piezas con SO y RFT sinterizadas a diferentes temperaturas vs. Contenido de basalto. | 91 |
| Figura 3.38 Densidad aparente de las piezas cerámicas con SR5 y RFT sinterizadas a distintas temperaturas vs. Contenido de basalto. | 92 |
| Figura 3.39 Porosidad aparente de las piezas con SR5 y RFT sinterizadas a diferentes temperaturas vs. Contenido de basalto. | 92 |
| Figura 3.40 Densidad aparente de las piezas con SR5 y RFA sinterizadas a diferentes temperaturas vs. Contenido de basalto. | 93 |
| Figura 3.41 Porosidad aparente de cerámicos con SR5 y RFA sinterizados a diferentes temperaturas vs. Contenido de basalto. | 93 |
| Figura 3.42 MOR de las piezas con SR5 y RFT sinterizadas a diferentes temperaturas vs. Contenido de basalto. | 94 |
| Figura 3.43 MOR de las piezas con SR5 y RFA sinterizadas a diferentes temperaturas vs. Contenido de basalto. | 94 |
| Figura 3.44 Procedencia de los basaltos de la FSG utilizados para la caracterización básica para uso ornamental. | 95 |
| Figura 3.45 Tamaño de grano y texturas de los basaltos. | 96 |
| Figura 3.46 Parches vítreos observados en el basalto Oberá (centro del corte). | 96 |
| Figura 3.47 Superficies naturales y pulidas de los basaltos estudiados. | 98 |
| Figura 4.1 Información climática de la Provincia de Misiones y de la Estación Meteorológica Iguazú del SMN (ubicada a 100 km del área de estudio). | 103 |
| Figura 4.2 Topografía de la zona de estudio. | 105 |
| Figura 4.3 Rasgos hidrológicos de la zona de estudio. | 110 |
| Figura 4.4 Distribución de los remanentes de bosques nativos en la zona de estudio según el Inventario Nacional de los Montes Nativos Año 2010 (actualización realizada por el Gobierno de la Provincia de Misiones). | 112 |
| Figura 4.5 Ubicación de la zona de estudio en el Departamento Eldorado. | 114 |
| Figura 4.6 Distribución geográfica de aldeas guaraníes. | 115 |
| Figura 4.7 Ocupación territorial en la zona de Eldorado. | 116 |
| Figura 4.8 Grandes usos del suelo en los municipios incluidos en la zona de estudio. | 117 |
| Figura 4.9 Distribución de algunos usos del suelo en la zona de estudio. | 118 |
| Figura 4.10 Registros de la extracción de basalto y arenas de río proporcionadas por la Dirección General de Geología y Minería de Misiones. | 119 |
| Figura 4.11 Producción de áridos en Argentina por provincia. | 121 |
| Figura 4.12 Explotaciones de <i>tosca</i> (basalto alterado). | 123 |
| Figura 4.13 Actividades que se desarrollan durante la explotación de canteras basálticas. | 124 |
| Figura 4.14 Canteras abandonadas con distintas situaciones de cierre. | 125 |
| Figura 5.1 Afloramientos de rocas basálticas y volcánicas básicas en la República Argentina. | 133 |

Lista de Cuadros

| | N° Pág. |
|---|---------|
| Cuadro 2.1. Criterios de clasificación para los magmas tipo según Peate <i>et al.</i> (1992). | 16 |
| Cuadro 2.2. Características composicionales para la clasificación de magmas tipo seleccionadas por Peate (1997). | 17 |
| Cuadro 2.3 Terminología para la descripción de productos eruptivos adoptadas por Waichel (2006). | 21 |
| Cuadro 2.4 Antecedentes cartográficos georeferenciados y digitalizados. | 25 |
| Cuadro 2.5 Diferentes niveles dentro de un derrame basáltico, según Leinz (1949). | 28 |
| Cuadro 2.6 Rasgos litológicos y estructurales relacionados con los procesos de enfriamiento, flujo, inflación, cristalización y segregación magmática. Fuente: Arioli (2008): 82. | 29 |
| Cuadro 2.7 Principales características de los frentes de exposición descriptos y muestreados. | 33 |
| Cuadro 2.8 Antecedentes de estudios mineralógicos y químicos efectuados en PE-5 (cantera Freyer, Eldorado, Misiones). | 35 |
| Cuadro 2.9 Elementos mayoritarios (%) y traza (ppm) de las rocas volcánicas de la zona de estudio. | 43 |
| Cuadro 2.10 Clasificación de los basaltos del área de estudio basada en Peate <i>et al.</i> (1992). | 46 |
| Cuadro 3.1 Propiedades físicas y tecnológicas de algunos basaltos de la FSG Provincia de Misiones (Escobar, J. A. 2001). | 54 |
| Cuadro 3.2 Características importantes para el uso de rocas basálticas como materia prima petrográfica según De la Fuente <i>et al.</i> 1990. | 59 |
| Cuadro 3.3 Aplicación ornamental de basaltos compactos en obras exteriores según Muller (1996). Simplificado de Lorenz y Gwosdz 2004. | 61 |
| Cuadro 3.4 Aplicación de basaltos compactos en obras interiores según Muller (1996). Simplificado de Lorenz y Gwosdz 2004. | 62 |
| Cuadro 3.5 Valores guía según Normas DIN seleccionados de la recopilación de Lorenz y Gwosdz 2004. | 62 |
| Cuadro 3.6 Composición química de las muestras basálticas (wt %). | 71 |
| Cuadro 3.7 Composición química del material arcilloso (wt %). | 74 |
| Cuadro 3.8 Propiedades de los materiales arcillosos. | 76 |
| Cuadro 3.9 Ensayos prioritarios según la función del revestimiento. Según Frascá (2002). | 97 |
| Cuadro 3.10 Resultados de los ensayos realizados a los basaltos Eldorado y Oberá. | 98 |
| Cuadro 3.11 Comparación de las características tecnológicas de los basaltos estudiados con variedades comerciales de rocas volcánicas ornamentales. | 99 |
| Cuadro 4.1 Principales características de los Órdenes (Soil Taxonomy) de suelos presentes en la provincia de Misiones, según Pereyra (2012). | 108 |
| Cuadro 4.2 Arqueología Precolonial de Misiones (Laponte y Carbonera 2015). | 113 |

CAPÍTULO 1

Introducción

CAPÍTULO 1

Introducción

Presentación y objetivos de la tesis

El territorio de la provincia de Misiones (29.801 km²) forma parte de la cuenca sedimentaria del Paraná (1.200.000 km²) que abarca la región NE de Argentina, se extiende principalmente en Brasil y ocupa el sector oriental de Paraguay y norte de Uruguay. La historia geológica de esta cuenca, iniciada en el Ordovícico superior, incluye la ocurrencia de un evento volcánico de escala continental que tuvo como resultado la formación de una de las más grandes provincias ígneas continentales del planeta conocida como Paraná-Etendeka (SE de Sudamérica y NW de África), cuyo origen se relaciona con la fractura del continente Gondwana y con la apertura del océano Atlántico Sur a fines del Mesozoico.

La geología de Misiones está constituida principalmente por estas rocas volcánicas que, con algunas intercalaciones de areniscas contemporáneas, conforman la Meseta Misionera, una espesa formación de basaltos tholeíticos (Formación Serra Geral), de edad Cretácico inferior, cubierta en buena parte del territorio por depósitos formados a partir de procesos de meteorización y edafización, que actuaron sobre estas litologías bajo condiciones de altas temperaturas y humedad. En forma subyacente a las coladas basálticas, se encuentran las areniscas continentales de la Formación Botucatú (Triásico inferior - Jurásico superior), principal reservorio del Sistema Acuífero Guaraní (SAG), las que también se hallan expuestas en determinados sectores de la provincia (Marengo y Net 2004).

En contraste con los numerosos estudios realizados sobre las rocas volcánicas de la cuenca del Paraná, particularmente en Brasil, el conocimiento geológico de estas rocas en el NE de Argentina todavía se encuentra poco desarrollado. No obstante, en los últimos años se han producido algunos avances dados principalmente por contribuciones científicas sobre aspectos geoquímicos, paleomagnéticos y geodinámicos (Lagorio y Leal 2005a, Lagorio y Leal 2005b, Mena *et al.* 2006, Lagorio y Vizán 2011 y Vizán y Lagorio 2011). Cabe mencionar también las tareas que se encuentra efectuando el Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) para la elaboración de las Cartas Geológicas -a escala 1: 250.000- 2757-IV Posadas, 2754-III Oberá y 2754-I Eldorado, las cuales todavía no han sido publicadas.

Por otra parte, en el campo aplicado, si bien existen muchos antecedentes del estudio de estos basaltos desde el punto de vista geotécnico -por constituir en la región el asiento de importantes obras civiles (represas, puentes internacionales, carreteras y otras)- así como también, desde el punto de vista de su utilización como material para la construcción -especialmente como árido para la producción de agregados pétreos- son escasos los avances en la investigación de otros posibles aprovechamientos que podrían ampliar los

usos actuales y, adicionalmente, contribuir al manejo de los residuos mineros de su explotación y procesamiento, en beneficio de la protección del medio ambiente.

Este panorama generó el interés por desarrollar estudios para incrementar los conocimientos de la geología de la provincia de Misiones, y asimismo, investigar la aptitud de las rocas basálticas de la Formación Serra Geral como materia prima para usos alternativos que pudieran complementarse con los conocidos en la región. En base a ello, se formularon los siguientes objetivos:

- Contribuir al conocimiento geológico de un sector del territorio de la provincia de Misiones, especialmente de los cuerpos basálticos de la Formación Serra Geral.
- Evaluar las aptitudes de las rocas basálticas como materia prima de uso cerámico y otros alternativos.

Para llevar a cabo esta tarea, se seleccionó un área de estudio situada en el NW de la provincia de Misiones (Dpto. Eldorado), debido principalmente a las buenas condiciones de accesibilidad que presenta la zona y a la existencia de varias canteras, algunas de ellas en funcionamiento y otras inactivas. Los muestreos para los estudios geológicos fueron realizados en los frentes abiertos en estos sitios y las descripciones allí efectuadas, posteriormente complementadas con observaciones en los cortes expuestos a partir de las principales rutas (RN 12 y RP 17) y en los afloramientos de varios cursos de agua (Puerto sobre el Río Paraná, A° Piray Guazú, A° Piray Miní y otros). Los basaltos fueron caracterizados a través de análisis petrográficos y geoquímicos y clasificados de acuerdo con la propuesta de magmas tipo para la provincia ígnea de Paraná realizada por Peate *et al.* (1992).

Los estudios tecnológicos se centraron en la evaluación de la aptitud de estas rocas para aplicaciones cerámicas. Adicionalmente también se realizaron ensayos para usos ornamentales. En el primer caso, se trata de una alternativa con antecedentes favorables en materiales similares de otras regiones y también con resultados promisorios obtenidos en el país, donde los basaltos han sido considerados dentro de las materias primas no convencionales para la industria cerámica (Hevia 2006). En el segundo caso, si bien el uso ornamental de estas rocas en la región es limitado, en los últimos años se observa una mayor tendencia a su incorporación en obras de arquitectura y decoración que buscan rescatar y valorizar el efecto estético de la utilización de materiales locales. Por ello, se consideró relevante realizar algunas pruebas básicas orientadas a la evaluación del potencial de este recurso dentro del campo ornamental, como una alternativa más de uso. Para todos estos ensayos se utilizaron basaltos seleccionados del área de estudio y otros procedentes de la zona centro de la provincia, éstos últimos con propósitos comparativos. Los estudios cerámicos requirieron la preparación de mezclas de distinta composición con materiales arcillosos para lo cual se emplearon arcillas de la región, conocidas en Misiones como barro ñau. La decisión de usar ñau para los estudios cerámicos responde asimismo a la intención de procurar un aprovechamiento integral de los recursos geológicos de la provincia.

Finalmente, junto con la caracterización geológica y los estudios para aplicaciones alternativas, se incluyó una caracterización ambiental de la zona de estudio. Esta caracterización tiene por objetivo contextualizar a la minería del basalto en relación con el medio en el cual se desarrolla, considerando sus principales impactos así como también las restricciones o limitaciones dadas por la normativa vigente. En este sentido, durante el trabajo, despertó especial atención la generación de material particulado en las plantas de trituración y de fabricación de hormigón. Si bien en el proceso de producción de asfalto estas fracciones finas tienen aprovechamiento, en otras situaciones constituyen residuos cuya disponibilidad implica costos muy bajos en comparación con aquellos que deberían ser considerados para realizar la molienda de estas rocas a los fines de su utilización, por ejemplo, en aplicaciones cerámicas. Por ello, se decidió efectuar también pruebas de aptitud utilizando materiales de esa procedencia con el propósito de comparar su desempeño en relación con los basaltos molidos en el laboratorio. Combinar usos alternativos con soluciones para la disposición de los residuos generados en las plantas, podría convertirse en una opción con ventajas ambientales y productivas.

Organización de la tesis

La tesis está organizada en cinco capítulos. El Capítulo 1, “*Introducción*”, contiene la presentación y objetivos de la tesis, la organización del trabajo y la ubicación y descripción general de la zona de estudio.

En el Capítulo 2 se presenta la “*Caracterización Geológica del Área de Estudio*”, la cual incluye una descripción del marco geológico regional, las características de la geología local, los materiales y métodos empleados y los resultados obtenidos.

El Capítulo 3 “*Usos de las rocas basálticas. Aptitudes cerámicas y ornamentales*” comienza con una revisión de las características generales de las rocas basálticas y de sus principales usos conocidos. A continuación se presentan los estudios de aptitud efectuados con los materiales basálticos de la Formación Serra Geral. Los materiales y métodos empleados y los resultados obtenidos se exponen por separado y de acuerdo al uso estudiado.

En el Capítulo 4 se presenta la *Caracterización Ambiental del Área de Estudio*, donde se realiza una síntesis de los principales rasgos ambientales a nivel provincial y local (zona de tesis), junto con una caracterización general de los impactos ambientales resultantes del aprovechamiento de las rocas basálticas y un análisis de las restricciones identificadas para la minería del basalto en la zona de tesis.

Finalmente, en el Capítulo 5, *Consideraciones Generales y Conclusiones*, se integra la información obtenida y se exponen las principales conclusiones derivadas del trabajo realizado.

Ubicación del área de estudio

El área de estudio se ubica en el NW de la Provincia de Misiones, en su mayor parte en el departamento Eldorado y en pequeñas porciones de los departamentos de Montecarlo, en el extremo sur, e Iguazú, en el extremo noroeste (Figura 1.1). La superficie de interés abarca todo el municipio de Eldorado, parte de los municipios de Colonia Victoria y Colonia Delicia y muy pequeños sectores de los municipios de 9 de Julio, Puerto Esperanza, Piray y Montecarlo.

Las coordenadas geográficas de la zona son NW: 26° 10' 00'' de latitud sur, 54° 45' 00'' de longitud oeste; NE: 26° 10' 00'' de la latitud sur, 54° 30' 00'' de longitud oeste; SE: 26° 30' 00'' de latitud sur, 54° 30' 00'' de longitud oeste y SW: 26° 30' 00'' de latitud sur, 54° 45' 00'' de longitud oeste (Figura 1. Los límites en el sistema de proyección conforme de Gauss – Krüger (Faja 7, Datum Campo Inchauspe) son N 7.106.732.73 a N 7.069.922.73 y E 7.425.013.51 a E 7.450.153.51.

El área limita al oeste con el río Paraná, frontera internacional con la república del Paraguay; tiene una superficie de 645 km² y forma parte del extremo NW de la hoja geológica Eldorado 2754-I, aún no publicada por el SEGEMAR.

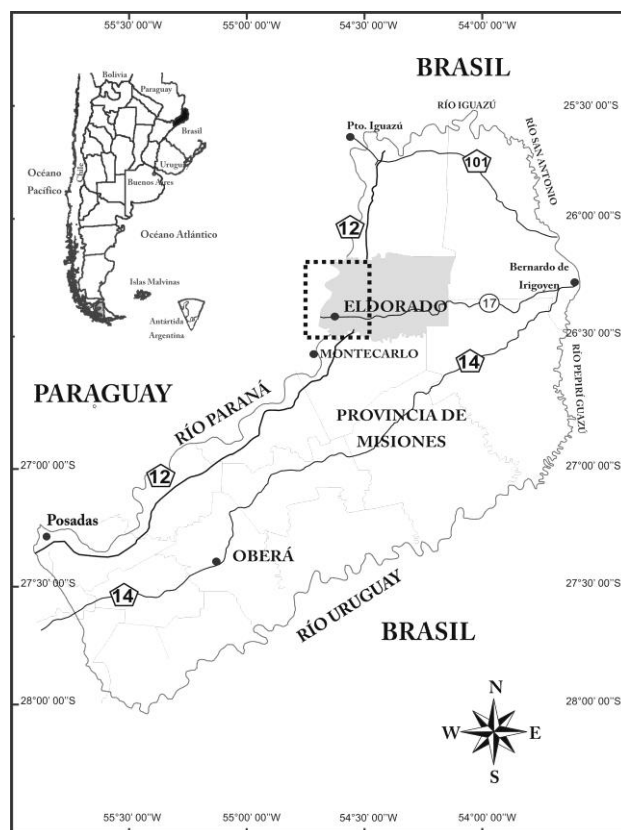


Figura 1.1: Ubicación de la zona de estudio. El rectángulo con línea de puntos indica el área de estudio y el sombreado gris los límites del departamento Eldorado, Provincia de Misiones.

El principal acceso a la zona de estudio se realiza a través de la ruta nacional N° 12, la cual recorre el área en dirección norte – sur. En forma transversal a ésta (dirección este – oeste) existen varias rutas provinciales primarias y secundarias, en su mayoría no pavimentadas (N° 18, N° 17, N° 16 y N° 226), entre las que se destaca por su importancia la RP N° 17

(pavimentada) la cual vincula a Eldorado (ubicada sobre la RN 12 en la intersección con la RP N° 17) con Bernardo de Irigoyen (a 123 km), único paso fronterizo seco en la frontera entre Brasil y Argentina. La red vial del sector se completa con caminos terciarios de jurisdicción municipal.

Eldorado, cabecera del departamento homónimo, está situada a 209 km de Posadas y a 100 km de Puerto Iguazú y es el centro poblado más importante dentro del área de estudio. Comenzó como una colonia agrícola fundada el 29 de septiembre de 1919 por Adolfo Julio Schwelm, la que inicialmente estuvo habitada por inmigrantes alemanes, daneses, suizos, rusos, polacos e ingleses, a los que se sumaron criollos, paraguayos y brasileños (Arenhardt 2009). Actualmente es un municipio de 1° categoría con 63.931 habitantes (IPEC 2015) que contiene a una de las ciudades más importantes de Misiones, después de Posadas y Oberá (puesto provincial N° 3 por población).

El clima es subtropical húmedo sin estación seca, con régimen pluviométrico isohigro. La temperatura media anual en Eldorado es de 20° C con una amplitud térmica entre enero y julio de alrededor de 10° C. De mayo a agosto se producen heladas. La estación más lluviosa es la primavera, mientras que las mayores diferencias hídricas se dan en la primera mitad del verano. Las precipitaciones oscilan entre 1700 mm y 1800 mm anuales (Gunther *et al.* 2008).

La zona de estudio (Figura 1.2) coincide con dos de las nueve regiones naturales descriptas para Misiones en el Atlas de suelos de la República Argentina (SAGyP, INTA, Proyecto PNUD ARG 85/019 – Área Edafológica, 1989). Estas regiones fueron definidas a partir de criterios geomorfológicos (geoformas dominantes e inclusiones; tipo y grado de pendientes; madurez del paisaje, entre otros) asociados a los tipos de suelos identificados con el sistema de clasificación Soil Taxonomy y a las características de la vegetación natural. Según este antecedente, la mayor parte del área de trabajo corresponde a la región denominada *Pediplano parcialmente disectado*, la cual se ubica en una franja adyacente a los ríos Paraná e Iguazú y ocupa un 16,45% de la superficie de la provincia. El relieve de esta región se define como ondulado con lomas bien definidas como elemento dominante (pendientes medias mayores al 5%) y como inclusiones, sectores escarpados o inclinados con pendientes cortas hacia los cursos de agua. La formación de este paisaje, que se considera estabilizado, se atribuye a un proceso de fluviopediplanación subreciente. Los suelos son rojos profundos (Alfisoles y Ultisoles) y la vegetación natural es la Selva Subtropical de Lauráceas. Estos suelos son conocidos como “tierra colorada” y son los de mejor aptitud agrícola en la provincia para cultivos perennes (yerba mate, té, cítricos, etc.) y para la actividad forestal. De manera más restringida, el sector este de la zona de estudio, corresponde a la región denominada *Relieve fuertemente ondulado o colinado o Región Premontañosa*, la cual se caracteriza por presentar lomas con pendientes medias y cortas de hasta el 20% asociadas a sectores escarpados e inclinados. Los suelos (Ultisoles) tienen una evolución intermedia, son rojos, profundos a moderadamente profundos con buena fertilidad natural y están asociados a suelos muy poco evolucionados (Molisoles) ubicados en sectores escarpados. Las limitaciones de estos últimos (pedregosidad, elevado riesgo de erosión al eliminar la cubierta vegetal) determinan el uso forestal.

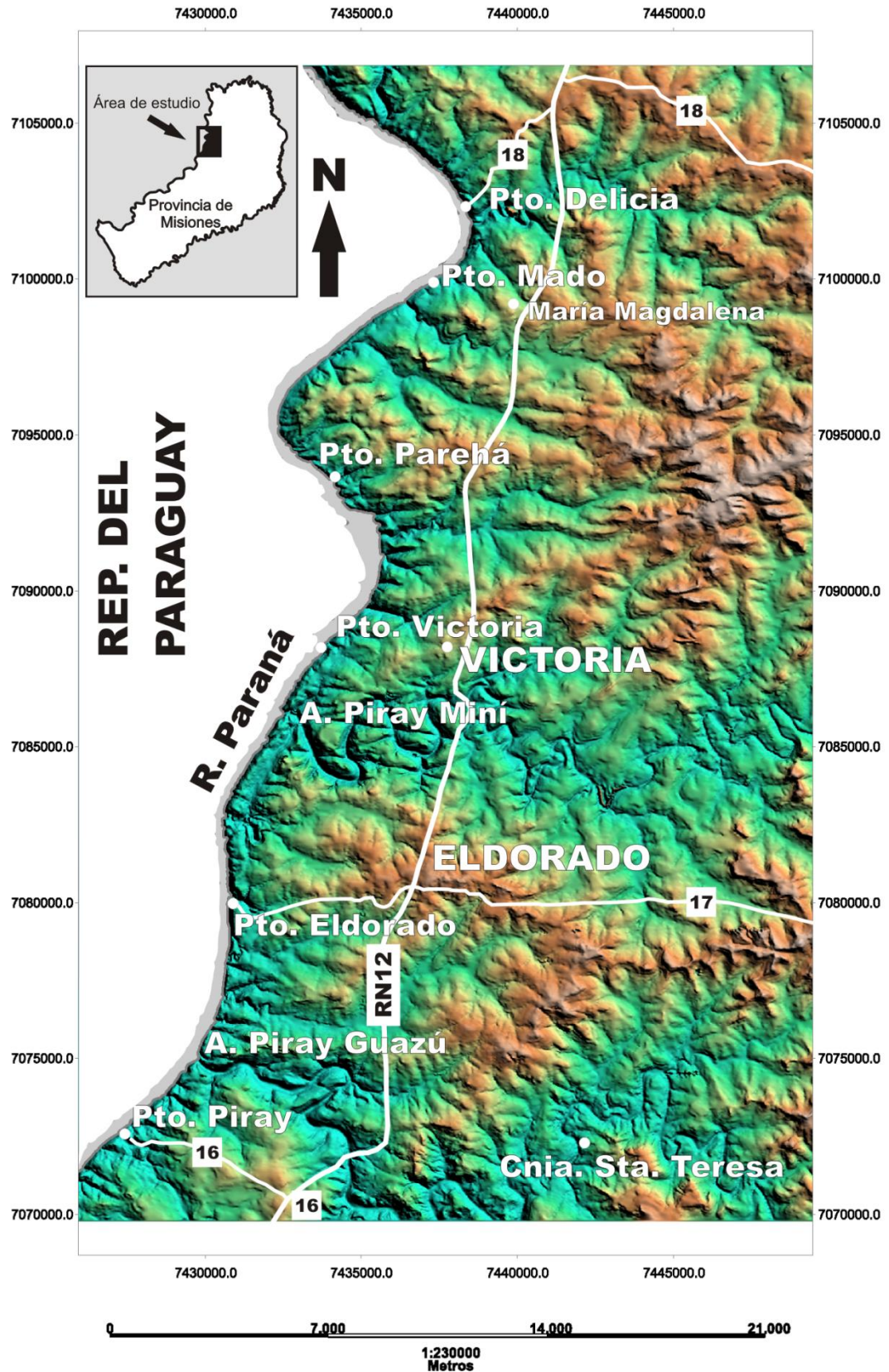


Figura 1.2: La zona de estudio representada a través de un modelo digital de elevación (DEM). Los colores marrones corresponden a las mayores alturas, mientras que los verdes a las menores. El DEM fue realizado a partir de los antecedentes topográficos de CARTA 1964 (hojas topográficas 1:10.000 con equidistancias de 5 m).

La zona presenta estructuras lineales (fracturas y grandes diaclasas) con orientaciones principales NE-SW, NW-SE y E-W, las cuales han influenciado el desarrollo de la red de drenaje. Los arroyos más importantes son el Piray Guazú y el Piray Miní, ambos límites naturales del municipio de Eldorado. Estos arroyos desembocan en el río Paraná junto con otros cursos, como por ejemplo (de norte a sur) los arroyos Aguaray Guazú, Aguaray Miní, Yacutinga, Parehá, Helena, Pomar y otros.

La ubicación biogeográfica del área de estudio corresponde a la eco-región denominada Selva Paranaense o Bosque Atlántico del Alto Paraná, la cual ocupa la mayor parte de la Provincia de Misiones en Argentina. La explotación de la selva y su conversión para otros usos, han reducido significativamente las superficies originalmente ocupadas por vegetación natural. Los remanentes de bosques nativos que aún se conservan en el área de estudio, corresponden a las categorías I, II y III, según la Ley de Ordenamiento de Bosques Nativos de la Provincia de Misiones (Ley Provincial XVI N° 105 y Ley Nacional 26.331/10). Las dos primeras no permiten la conversión para otros usos, sí es posible, de acuerdo a ley, convertir las superficies identificadas con la categoría III, las cuales corresponden a bosques secundarios, bosques rurales y áreas con bosques degradados en tierras agropecuarias.

Desde el punto de vista productivo, Eldorado junto con Montecarlo (municipio vecino), fue identificada como localidad de referencia para la Zona Agroeconómica Homogénea Noroeste (ZAH 1). Estas zonas fueron definidas por el INTA (cinco en total para la provincia de Misiones) y corresponden a porciones del territorio que comparten características similares de suelos, clima y uso del suelo, así como también aspectos sociales, naturales, productivos, económicos, estructurales e institucionales (Gunther *et al.* 2008). De acuerdo a este trabajo, la ZAH 1, donde se encuentra incluida el área de estudio, es la de mayor importancia forestal, tanto por la producción primaria como industrial. Cuenta con el 62% de la capacidad industrial del sector forestal y el 58 % de las plantaciones forestales de la provincia (principalmente forestaciones con *Pinus elliottii* y *Pinus taeda*). Dentro de los cultivos perennes se destaca el cultivo de la yerba mate.

A nivel local, Eldorado, junto con los municipios de Colonia Victoria, Colonia Delicia, 9 de Julio, Santiago de Liniers y Puerto Piray, integra la Microrregión del Alto Paraná (Unidad de Gestión de Proyectos, Municipalidad de Eldorado Misiones 2009), la cual posee una superficie total de 225.962 hectáreas y una estructura social agraria, caracterizada por la presencia de empresas medianas y grandes que manejan superficies mayores (empresas forestales) y pequeños productores agrícolas que implementan sistemas productivos muy diversificados.

La actividad minera que se desarrolla en la zona de estudio, al igual que en la mayor parte de la provincia, consiste en la explotación de áridos para la construcción. Se explotan las rocas basálticas de la Formación Serra Geral, las arenas del río Paraná así como también el saprolito o tosca (basalto meteorizado) y el suelo colorado. Las explotaciones de basalto son pequeñas canteras, la más grande está asociada con una planta de trituración y de fabricación de hormigón, pertenecen a emprendimientos familiares y abastecen las demandas locales del sector de la construcción.

CAPÍTULO 2

Caracterización Geológica del Área de Estudio

CAPÍTULO 2

Caracterización Geológica del Área de Estudio

Introducción

Las rocas más antiguas que afloran en el área de estudio pertenecen a la gran Provincia Ígnea Paraná-Etendeka, uno de los campos de lava más importantes del Fanerozoico. El volcanismo que produjo este plateau basáltico ocurrió durante el Cretácico inferior y está asociado con la apertura del Océano Atlántico Sur. Las lavas originadas durante este evento magmático (134-129 Ma) se ubican actualmente en el centro-este de Sudamérica, en la cuenca del Paraná (Brasil, Uruguay, Paraguay y norte de Argentina) y en África, en el noroeste de Namibia (Etendeka) y regiones costeras de Angola.

Estas rocas han recibido diferentes denominaciones estratigráficas: Formación y Grupo Serra Geral (Brasil); Formación Alto Paraná (Paraguay), Formación Arapey (Uruguay) y Miembro Posadas de la Formación Curuzú Cuatiá (Argentina). En esta tesis serán referidas como Formación Serra Geral (FSG), denominación de uso más generalizado en nuestro país.

Los derrames de la FSG ocurrieron sobre un extenso desierto cuyos depósitos se conocen como Formación Botucatú. Se trata de areniscas de origen eólico y edad Triásico inferior – Jurásico superior, originadas en condiciones climáticas áridas que se habrían mantenido durante todo el desarrollo del evento magmático. Esto es consistente con la presencia de depósitos sedimentarios eólicos intercalados en el paquete volcánico y con la existencia de areniscas similares (Formación Caiuá), situadas por encima de estas lavas en el norte de la provincia ígnea (Brasil).

En Argentina las coladas basálticas de la FSG están expuestas en la provincia geológica Mesopotamia, principalmente en la Meseta Misionera, extendiéndose en el subsuelo hasta los límites reconocidos en la cuenca Chacoparanaense (Chebli *et al.* 1999).

En Misiones, estratigráficamente por encima de estas rocas, existen depósitos cenozoicos conocidos como “suelos lateríticos” o “suelos colorados”, los cuales presentan una distribución superficial dominante en la zona de trabajo. De manera más restringida se encuentran también sedimentos modernos, cuyo origen se atribuye a depósitos coluviales y de inundación fluvial.

En este capítulo se reúnen los estudios realizados con el propósito de ampliar el conocimiento geológico, petrográfico y geoquímico del área de estudio, especialmente de las coladas basálticas expuestas en la zona, en relación con el interés de establecer la aptitud de uso de estos materiales en aplicaciones cerámicas y otras alternativas (Capítulo 3 de este trabajo). Para tal fin, en primer lugar, se presenta una descripción del marco regional, realizada a partir de antecedentes bibliográficos sobre la Provincia Paraná-Etendeka y sobre la cuenca del Paraná. La información seleccionada abarca los principales

rasgos geológicos y aquellos del magmatismo considerados significativos para contextualizar el objeto de estudio. Las características de la geología local incluyen una síntesis de los estudios previos, la descripción de los materiales y métodos empleados y los resultados obtenidos.

Marco regional

Antecedentes

La bibliografía sobre Paraná-Etendeka y sobre el volcanismo de la cuenca del Paraná en Sudamérica, es muy abundante y variada. Los tópicos abordados incluyen temas de geología regional, edad del magmatismo, aspectos petrológicos y geoquímicos, aspectos geofísicos, aspectos aplicados, por hacer mención de los principales.

Mincato (2000) clasificó las publicaciones sobre el magmatismo de Paraná en cinco categorías esquemáticas: 1) primeros estudios descriptivos (1870 a 1960); 2) estudios paleomagnéticos y dataciones K-Ar (década de 1960, en coincidencia con el surgimiento de la teoría de la tectónica de placas); 3) estudios geoquímicos (décadas de 1970 y 1980); 4) estudios estratigráficos y dataciones ^{40}Ar - ^{39}Ar (década 1990); y 5) estudios metalogenéticos (década de 1990).

Posteriormente, durante los años 2000, continuaron los aportes sobre estos mismos temas al tiempo que se sumaron nuevas orientaciones desarrolladas, en muchos casos, en el marco de la elaboración de tesis doctorales. A modo de ejemplo, pueden mencionarse los trabajos realizados sobre la geología física de la FSG e interacciones lava-sedimento, en el Estado de Paraná, Brasil (Waichel 2006 y Waichel *et al.* 2006); sobre la génesis y patrones de distribución de minerales secundarios en la FSG, en el Estado de Rio Grande do Sul, Brasil (Frank 2008); trabajos para determinar asociaciones faciológicas en la FSG y evaluar el significado exploratorio de las anomalías EGP (elementos del grupo del platino) y metales asociados, en el Estado de Paraná, Brasil (Arioli 2008) y estudios orientados a determinar la existencia de interacciones contaminantes entre el acuífero de la FSG y el Sistema Acuífero Guaraní en Riberão Preto, Brasil, basados en aspectos de geología física, petrografía y geoquímica (Fernandes *et al.* 2010), entre otros.

Existen también antecedentes de compilación y de revisión muy útiles a los fines de obtener una buena aproximación a las características del magmatismo de Paraná-Etendeka, entre los cuales se destacan el trabajo editado por Piccirillo y Melfi (1988) y la síntesis elaborada por Peate (1997) en el libro sobre grandes provincias ígneas de Mahoney y Coffin (1997). Se trata, en el primer caso, de contribuciones realizadas principalmente por científicos brasileños e italianos, las cuales aportaron, además de una revisión de los principales aspectos petrogenéticos y geofísicos, una gran cantidad de datos geoquímicos. Por otra parte, Peate (1997), una década más tarde, condensó los avances del conocimiento en diversas cuestiones, al tiempo que revisó los modelos geodinámicos desarrollados para explicar los rasgos más importantes de la provincia. Ambas publicaciones provén mucha

información y son, junto con varios trabajos de la última década, las principales referencias de las características que a continuación se mencionan.

Extensión y edad del magmatismo

El volcanismo de la cuenca del Paraná en Sudamérica y el coetáneo de Etendeka y Angola en África, constituyen una gran provincia ígnea (LIP) debido a su extensión y tiempo de evolución (Figura 2.1). Esta categoría se utiliza para las provincias ígneas que tienen una extensión mayor a 100.000 km² y cuyo desarrollo en el tiempo aconteció en breves lapsos geológicos (LLambías 2008). Las grandes provincias ígneas (LIPs) incluyen plateaus oceánicos, basaltos de inundación continental y márgenes volcánicos pasivos. Paraná-Etendeka es un ejemplo típico de emplazamiento de basaltos de inundación continental (CFB) al igual que, por ejemplo, las LIPs de Columbia River, Deccan, Karoo y Siberia. Los primeros modelos para explicar el origen y evolución de las inundaciones basálticas de Paraná-Etendeka, como en el caso de otras provincias, postulan la acción de una pluma térmica en interacción con la litósfera. Sin embargo, el rol de las plumas en la formación de grandes volúmenes de magma es todavía un tema de debate.



Figura 2.1: Gran Provincia Ígnea Paraná-Etendeka. Reconstrucción de la extensión del magmatismo en América del Sur y África, modificado de Peate (1997): 219. El rectángulo rojo indica la ubicación de la zona de estudio (Eldorado).

La extensión espacial de este magmatismo es citada en la literatura en el orden de los $1,2 \times 10^6$ km² de superficie y 800.000 Km³ de volumen. No obstante, estimaciones realizadas por Frank *et al.* (2009) consideran que en Sudamérica el área ocupada por estas lavas es de

917.000 km² (+/- 15.000 km²) y que su volumen es superior a los 600.000 km³. Los cálculos de estos autores sugieren considerar que el volumen de magma generado durante la formación de la provincia como un todo, sería no menor a 1.700.000 km³.

Con respecto a la edad y evolución de la actividad ígnea, existen muchos datos radimétricos procedentes de trabajos realizados especialmente en Brasil. Según la revisión de Rocha-Campos *et al.* (1988), los estudios geocronológicos comenzaron en la década de 1960 y hasta fines de 1980 consistieron básicamente en determinaciones K-Ar (se mencionan aproximadamente 206 datos para el período) y algunos controles Rb-Sr. A partir de 1990, con las dataciones ⁴⁰Ar-³⁹Ar, comenzaron también las discusiones sobre la validez de las técnicas analíticas utilizadas debido a las discrepancias iniciales en los resultados obtenidos. De acuerdo a las síntesis de Peate (1997) y Mincato (2000), las primeras conclusiones provienen de estudios realizados en el sur de la provincia (Hawkesworth *et al.* 1992 y Renne *et al.* 1992), los cuales coincidieron en que el magmatismo habría comenzado a los 133 ± 1 Ma y habría durado menos de 1 Ma. En contraposición, estudios posteriores que abarcaron toda la provincia (Turner *et al.* 1994) propusieron un mayor rango de duración de aproximadamente 10 Ma entre los 137 y 127 Ma. Más tarde, Renne *et al.* (1996) efectuaron estudios en diques y filones capa (doleritas de Ponta Grossa) situados en el norte de la provincia, donde determinaron edades más jóvenes que las obtenidas en el sur ($131 \pm 0,4$ a 129 ± 5 Ma y unas pocas de 120 Ma). A partir de estos nuevos resultados corrigieron la estimación del pulso principal en aproximadamente 3 Ma, con un pico en los 130,5 Ma, y acordaron que la mayoría de los diques datados constituyen la fase más joven del magmatismo, representada en el norte de la provincia por lavas de alto Ti. Otros estudios contemporáneos con éstos (Stewart *et al.* 1996) reafirmaron las conclusiones de Turner *et al.* (1994), al establecer que el magmatismo duró de 10 a 12 Ma entre los 138 y 127 Ma y que tuvo un episodio principal entre los 134 y 129 Ma. Peate (1997) relativizó estas diferencias apuntando que la mayoría de los resultados ⁴⁰Ar-³⁹Ar se sitúan entre los 134 y 129 Ma y que existen buenas evidencias de la ocurrencia de un magmatismo temprano en el interior del continente, entre los 135-138 Ma (Turner *et al.* 1994 y Stewart *et al.* 1996 en Peate 1997) y de un magmatismo más joven que persistió a lo largo del margen costero entre los 128 y 120 Ma (Turner *et al.* 1994, Renne *et al.* 1996, Stewart *et al.* 1996 en Peate 1997). No obstante, las discrepancias en los datos ⁴⁰Ar-³⁹Ar son consideradas irresueltas por algunos investigadores, como Thiede y Vasconcelos (2010), quienes re-dataron tres muestras sobre las cuales originalmente se determinaron las edades extremas de un rango de 11 Ma para la duración del magmatismo. Los resultados obtenidos fueron los mismos para todas las muestras ($134,7 \pm 1$ Ma), lo cual fue interpretado como la confirmación de la hipótesis de una extrusión rápida para los CFB de Paraná. La Figura 2.2 resume los antecedentes citados.

Los esfuerzos destinados a precisar la edad del magmatismo y estimar el rango de las erupciones son imprescindibles para comprender los mecanismos térmicos involucrados en la generación de los flujos basálticos, como así también, para la construcción de modelos geodinámicos que los expliquen (Peate 1997).

Desde el punto de vista aplicado, obtener edades precisas también es importante, por ejemplo para la evaluación de depósitos Ni-Cu-EGP. De acuerdo a Mincato (2000), antecedentes sobre el tema indican que estos depósitos estarían asociados con las fases precoces del magmatismo de las provincias de CFB. Según este autor, los magmas bajos en Ti que predominan en el sur de la provincia (Gramado, según la clasificación de Peate *et al.* 1992) son los más favorables para este tipo de mineralización.

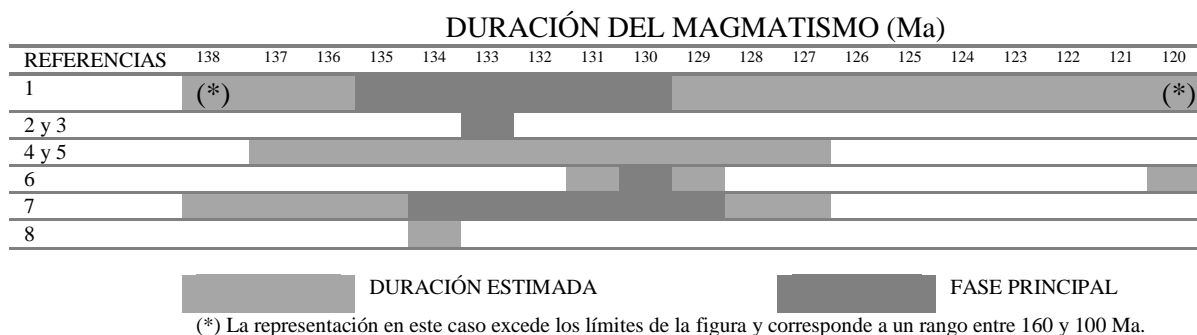


Figura 2.2: Duración del volcanismo de Paraná. Resumen de los antecedentes citados sobre la edad del magmatismo de Serra Geral. Referencias: 1. Rocha-Campos *et al.* (1988); 2. Renne *et al.* (1992); 3. Hawkesworth *et al.* (1992); 4. Mantovani *et al.* (1994); 5. Turner *et al.* (1994); 6. Renne *et al.* (1996); 7. Stewart *et al.* (1996); 8. Thiede y Vasconcelos (2010). Fuentes: Rocha-Campos *et al.* (1988); Renne *et al.* (1996); Peate (1997); Mincato (2000) y Thiede y Vasconcelos (2010).

Diferencias petrológicas y geoquímicas regionales

En términos generales, el magmatismo de la cuenca del Paraná ha sido descripto como bimodal, esencialmente básico y con manifestaciones ácidas subordinadas (Piccirillo *et al.* 1988c, Peate *et al.* 1992 y Peate 1997). Según Piccirillo y Melfi (1988), está representado por basaltos tholeíticos (90%), andesitas (7 %) y riolacitas–riolitas (3%), éstas últimas circunscritas a los márgenes continentales. De acuerdo a estos autores las rocas básicas son afíricas a subafíricas y de difícil distinción en el campo. Las rocas ácidas, en cambio, se distinguen fácilmente en dos variedades principales: Palmas y Chapecó. Las primeras se describen como afaníticas, negras y con fractura concoidal y se encuentran en los estados brasileños de Río Grande (principalmente), Santa Catarina y Paraná. Las del tipo Chapecó son porfíricas, grises y rojizas marrones cuando están alteradas y se ubican más al norte que las primeras y asociadas a ellas, en el estado de Paraná y norte del Estado de Río Grande do Sul. Acompañan a las volcanitas, enjambres de diques y filones capa (sills) concentrados en la costa de Brasil entre San Pablo y Río de Janeiro, en el este de Paraguay y sur de Etendeka (Peate 1997). Los enjambres de diques más significativos ocurren en el arco de Ponta Grossa con una dirección NW-SE y en la región costera de Brasil, entre Santos y Río de Janeiro. La composición de los niveles intrusivos es predominantemente basáltica y raramente riolacítica (Piccirillo *et al.* 1988c). Contemporáneamente a estas rocas también fueron emplazados en Brasil (Ponta Grossa, Anitapolis), este de Paraguay (Cerro Corá, Sapucay) y Uruguay (Mariscala), varios complejos alcalinos que incluyen carbonatitas, gabros alcalinos, fonolitas, sienitas y granitos (Ulbrich y Gomes 1981 y Milner *et al.* 1995, en Peate 1997). En Argentina, asociados al magmatismo de Serra Geral, han sido reconocidos en la Sierra Chica de Córdoba, basaltos alcalinos de la misma edad, que son atribuidos a procesos convectivos de menor escala, vinculados con la anomalía

térmica que habría generado el volcanismo de Paraná-Etendeka (Lagorio 2008 y Lagorio y Vizán 2011).

El estudio sistemático y regional de estas rocas comenzó en la década de 1980 a través de una cooperación internacional entre las Universidades de San Pablo (Brasil) y Trieste (Italia). Los resultados obtenidos demostraron la existencia de importantes variaciones en la distribución y geoquímica, tanto de las volcanitas, como del magmatismo intrusivo asociado (Piccirillo *et al.* 1988c). La provincia fue dividida en tres sectores: cuenca del Paraná norte (CPN), al norte del lineamiento Piquiri; cuenca del Paraná sur (CPS), al sur del lineamiento Río Uruguay y, cuenca del Paraná central (CPC), entre ambos lineamientos (Piccirillo *et al.* 1988a y 1988c) (Figura 2.3). Al respecto, es oportuno señalar que, de acuerdo a Peate *et al.* (1992), los mencionados lineamientos no implican un control sobre la naturaleza y distribución de las variaciones composicionales de los derrames. Se trata, en efecto, de una sectorización geográfica presumiblemente realizada para facilitar el manejo de la gran cantidad de datos generados durante la elaboración de estos estudios (Peate *et al.* 1992).

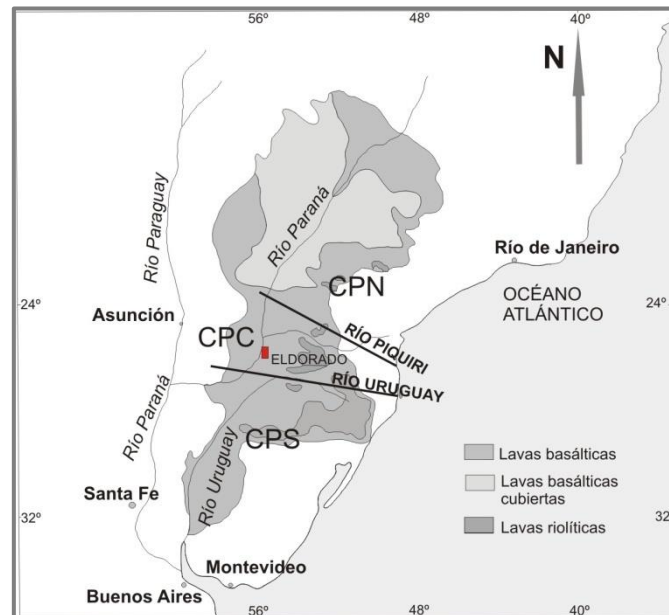


Figura 2.3: Mapa esquemático de la cuenca del Paraná donde se indican los sectores establecidos por Piccirillo *et al.* (1988c) (CPS: Cuenca del Paraná Sur, CPC: Cuenca del Paraná Central y CPN: Cuenca del Paraná Norte), simplificado de Piccirillo *et al.* (1988c): 108. El rectángulo rojo señala la ubicación de la zona de estudio (Eldorado).

Los resultados obtenidos permitieron identificar dos grupos principales de rocas: basaltos de alto Ti (HTi), enriquecidos en Ti ($Ti_2O > 2\%$) y elementos incompatibles y, basaltos de bajo Ti (LTi) empobrecidos en Ti ($Ti_2O < 2\%$) y elementos incompatibles. El primer grupo fue reconocido esencialmente en la CPN (basaltos tholeíticos y riolitas tipo Chapecó), mientras que el segundo fue distinguido predominantemente en la CPS (basaltos tholeíticos y riolitas tipo Palmas). Ambos grupos fueron encontrados en la CPC que fue interpretada como una región transicional. Los estudios revelaron también importantes variaciones isotópicas (Sr y Nd) asociadas con la sectorización de los grupos HTi y LTi. Estas diferencias geoquímicas fueron atribuidas por Piccirillo *et al.* (1988b) a la existencia de

fuentes mantélicas heterogéneas de tipo litosférico relacionadas con diferentes grados de fusión y con procesos de contaminación crustal. Contemporáneamente, otros autores asumieron la hipótesis de un manto homogéneo único y de tipo astenosférico (emergencia de una pluma mantélica) con distintos grados de fusión parcial (por ej. Fodor *et al.* 1987 en Mincato 2000). Modelos más recientes postulan un origen subcontinental litosférico, fuentes mantélicas heterogéneas y distintos grados de fusión atribuidos a procesos térmicos sin la intervención de plumas (Lagorio y Vizán 2011 y Vizán y Lagorio 2011).

Estudios regionales posteriores de Peate *et al.* (1992), llevados a cabo a partir datos publicados (un total de 2000 análisis), resultados de nuevos muestreos e información de subsuelo procedente de nueve perforaciones realizadas en la región central de la cuenca del Paraná (Brasil), reconocieron y definieron seis tipos de magmas que fueron denominados Gramado, Esmeralda, Ribeira, Urubici, Pitanga y Paranapanema. Los criterios composicionales y los valores de referencia utilizados para la identificación de cada uno de estos magmas tipo se reproducen en el Cuadro 2.1. Si bien la clasificación conserva la distinción de los estudios previos, entre magmas de bajo Ti (Gramado, Esmeralda y Ribeira) y, de alto Ti (Urubici, Pitanga y Paranapanema) no utiliza para ello el límite de 2% de TiO₂, por considerar que dicho valor es arbitrario y por lo tanto, inadecuado para reflejar el fraccionamiento natural que ocurre en los contenidos de TiO₂ (Peate *et al.* 1992). Esta clasificación considera dentro del grupo de alto Ti a magmas que tienen valores tan bajos como 1,7% de TiO₂ (Paranapanema) y, como de bajo Ti, a magmas con contenidos tan altos como 2,3% de TiO₂ (Esmeralda y Ribeira).

CUADRO 2.1: Criterios de clasificación para los magmas tipo según Peate *et al.* (1992)

| | Alto Ti (HTi) | | | Bajo Ti (LTi) | | |
|------------------------------------|---------------|-----------|--------------|---------------|------------|-------------|
| | Urubici | Pitanga | Paranapanema | Ribeira | Esmeralda | Gramado |
| SiO ₂ | > 49 | > 47 | 48 - 53 | 49 - 52 | 48 - 55 | 49 - 60 |
| TiO ₂ | > 3,3 | > 2,8 | 1,7 - 3,2 | 1,5 - 2,3 | 1,1 - 2,3 | 0,7 - 2,0 |
| P ₂ O ₅ | > 0,45 | > 0,35 | 0,2 - 0,8 | 0,15 - 0,50 | 0,1 - 0,35 | 0,05 - 0,40 |
| Fe ₂ O ₃ (t) | < 14,5 | 12,5 - 18 | 12,5 - 17 | 12 - 16 | 12 - 17 | 9 - 16 |
| Sr | > 550 | > 350 | 200 - 450 | 200 - 375 | < 250 | 140 - 400 |
| Ba | > 500 | > 200 | 200 - 650 | 200 - 600 | 90 - 400 | 100 - 700 |
| Zr | > 250 | > 200 | 120 - 250 | 100 - 200 | 65 - 210 | 65 - 275 |
| Ti/Zr | > 57 | > 60 | > 65 | > 65 | > 60 | < 70 |
| Ti/Y | > 500 | > 350 | > 350 | > 300 | < 330 | < 330 |
| Zr/Y | > 6,5 | > 5,5 | 4,0 - 7,0 | 3,5 - 7,0 | 2,0 - 5,0 | 3,5 - 6,5 |
| Sr/Y | > 14 | > 8 | 4,5 - 15 | 5 - 17 | < 9 | < 13 |
| Ba/Y | > 14 | > 9 | 5 - 19 | 6 - 19 | < 12 | < 19 |

Los tipos Urubici y Pitanga (HTi: TiO₂ > 3%), reconocidos respectivamente en el sur y norte de la provincia, se pueden separar principalmente a través de los contenidos de Sr y Fe₂O₃ (t). Los magmas tipo Urubici contienen Sr > 550 ppm y Fe₂O₃ (t) < 14,5% (Peate *et al.* 1992).

El tipo intermedio ITi (TiO₂ 2-3 %), distinguido por Piccirillo *et al.* (1988c) en la parte central de la cuenca e interpretado como una transición entre los tipos LTi y HTi, fue denominado por Peate *et al.* (1988) como magma tipo Paranapanema. Aunque

Paranapanema tiene contenidos más bajos de TiO_2 que Pitanga, ambos comparten rasgos en común que pueden dificultar su separación. Ésta se realiza a través del diagrama Fe_2O_3 (t) vs. TiO_2 , donde Paranapanema se diferencia de los tipos Urubici y Pitanga por sus contenidos más altos de Fe_2O_3 (t). Otros criterios importantes para separar estos magmas son los valores relativamente bajos de Paranapanema en Zr/Y ($< 6,0$) y Sr (< 450 ppm) (Peate *et al.* 1992).

El magma Ribeira es un magma LTi con valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0,7060$ que fue reconocido previamente por Petrini *et al.* (1987) en la parte norte de la provincia (Peate *et al.* 1992). Si bien comparte características geoquímicas con los magmas Esmeralda y Gramado (LTi), existen diferencias notables que permiten la separación entre ellos. No ocurre lo mismo con la distinción entre Ribeira y Paranapanema, la cual es calificada por Peate *et al.* (1992) como una de las más difíciles de la clasificación.

Los magmas Gramado y Esmeralda (LTi) se diferencian por los contenidos más altos de TiO_2 y Fe_2O_3 (t) y más bajos de SiO_2 que presentan los últimos con respecto a los primeros. No obstante, la distinción más clara entre ellos se evidencia a través de la relación Ti/Zr (Gramado < 60 y Esmeralda > 60).

La Figura 2.4 reproduce la distribución de estos magmas en la Provincia de Misiones, según las muestras analizadas por Peate *et al.* (1992). Los tipos identificados por estos autores corresponden principalmente a la variedad Paranapanema (ITi) y en menor medida a los magmas tipo Pitanga (HTi), Ribeira (LTi) y Esmeralda (LTi).

A partir del contenido de elementos traza y de características isotópicas, Peate *et al.* (1992) y Peate (1997), separaron a su vez a estos tipos de magma en dos grupos: (1) Gramado y Esmeralda y, (2) Urubici, Pitanga, Paranapanema y Ribeira. Para ello, estos autores utilizaron la relación $\text{Ti/Y} < 310$ (según el criterio de Hergt *et al.* 1991 en Peate 1997) para distinguir a los magmas Gramado y Esmeralda ($\text{Ti/Y} < 310$) de Paranapanema y Ribeira (> 310), que si bien presentan algunos valores similares de Ti, tienen otras características composicionales que los relacionan con las variedades de alto Ti (Pitanga y Urubici) (Peate 1997). El Cuadro 2.2 presenta la clasificación de los tipos magmas según el criterio Ti/Y y sus principales características composicionales de acuerdo a la selección realizada por Peate (1997).

CUADRO 2.2: Características composicionales para la clasificación de magmas tipo seleccionadas por Peate (1997)

| Magmas Tipo | Características | TiO_2 | Ti/Y | Ti/Zr | $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ |
|--------------|--------------------------------------|----------------|---------------|----------------|---------------------------------|
| Gramado | Bajo Ti/Y y Ti (sur) | 0,7-1,9 | < 310 | < 70 | 0,7075-0,7167 |
| Esmeralda | Bajo Ti/Y y Ti (sur) | 1,1-2,3 | < 310 | > 60 | 0,7046-0,7086 |
| Ribeira | Alto Ti/Y , Bajo Ti (norte) | 1,5-2,3 | > 310 | > 65 | 0,7055-0,7060 |
| Paranapanema | Alto Ti/Y y Ti (norte) | 1,7-3,2 | > 330 | > 65 | 0,7055-0,7063 |
| Pitanga | Alto Ti/Y y Ti (norte) | $> 2,9$ | > 350 | > 60 | 0,7055-0,7060 |
| Urubici | Alto Ti/Y y Ti (sur) | $> 3,3$ | > 500 | > 57 | 0,7048-0,7065 |

Los magmas del grupo (1) se caracterizan por presentar valores algo empobrecidos en Nb y Ta con respecto al La (Nb/La 0,5-0,8). El magma tipo Gramado tiene alto $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0,7075-0,7167) y bajo ϵNd_i (-8 a -3) en relación a Esmeralda, que presenta valores bajos de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0,7046 -0,7086) y altos de ϵNd_i (-4 a +3). Peate *et al.* (1992) distinguieron estos magmas en el sur de Brasil e interpretaron al tipo Esmeralda como una unidad más joven que se presenta superpuesta a los magmas Gramado. La distribución composicional reconocida por estos autores los llevó a suponer que más al sur (en Argentina y Uruguay) las lavas corresponderían únicamente al tipo Gramado (Peate 1997).

Dentro del grupo (2), el tipo Urubici tiene valores relativamente más altos de TiO_2 (>3,3) y de Ti/Y (>500) que los magmas Ribeira, Paranapanema y Pitanga. Presenta además un mayor fraccionamiento de las tierras raras pesadas (Tb/Yb Urubici ~0,58, Pitanga ~0,38). Peate *et al.* (1992) reconocieron esta composición en una franja de aproximadamente 100 km x 350 km al sur del Brasil (borde oriental de la provincia) y, en la base de algunas perforaciones en la parte central.

Los otros tres tipos, Ribeira, Paranapanema y Pitanga, tienen un amplio rango de contenidos de TiO_2 (1,5 – 4,1), patrones similares de elementos traza normalizados al manto primordial y diferencias en los valores de Ti/Y (por ej. Ribeira ~ 360, Paranapanema ~ 410 y Pitanga ~ 530). Los valores isotópicos de Sr, Nd y Pb de estos tres magmas presentan rangos acotados ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ = 0,7055-0,7063; ϵNd_i = -1,6 a -3,6; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ = 17,81 – 18,12) que permiten diferenciarlos de los otros tipos y agruparlos como los basaltos del “Norte” (Peate 1997). De acuerdo a Peate *et al.* (1992), estos tres magmas se encuentran espacialmente asociados, son dominantes en el norte de la provincia y sus manifestaciones podrían llegar tan al sur como el norte de Argentina (Peate 1997).

A partir de las diferencias composicionales reconocidas y de la delimitación regional de las mismas, Peate *et al.* (1992) propusieron un modelo que consideró a los magmas tipo como unidades cronoestratigráficas. Según la interpretación de estos autores el magmatismo habría migrado hacia el norte de la cuenca y habría tenido dos centros magmáticos principales que conformaron dos “provincias” sucesivas: una más antigua en el sur, que comprende a los magmas Gramado, Esmeralda y Urubici; y otra más joven, desarrollada aproximadamente a 750 km al norte, formada por los magmas Pitanga, Paranapanema y Ribeira (Peate *et al.* 1992). Según este modelo los derrames expuestos en el sur de Brasil y en el Uruguay corresponderían a las secuencias más antiguas de la provincia.

Posteriormente, nuevas evidencias e interpretaciones llevaron a Peate (1997) a considerar que los magmas tipo, definidos a priori como unidades cronoestratigráficas, podrían haber sido emplazados de manera diacrónica durante la evolución de la provincia. Peate (1997) encontró consistente esta propuesta con los datos ^{40}Ar - ^{39}Ar aportados por Turner *et al.* (1994) y Stewart *et al.* (1996).

Estudios geocronológicos (^{40}Ar - ^{39}Ar) realizados por Mincato (2000) concluyeron al respecto que el volcanismo habría migrado de este a oeste y de sur para norte, en coincidencia con el modelo de Peate *et al.* 1992 y en desacuerdo con otros autores que

postularon una migración en sentido NW - SE (Turner *et al.* 1994, 1996; Mantovani *et al.* 1994 y Stewart *et al.* 1996, citados en Mincato 2000).

Los diversos modelos mencionados, así como la edad y duración del magmatismo, constituyen por el momento, temas en desarrollo y aún en discusión.

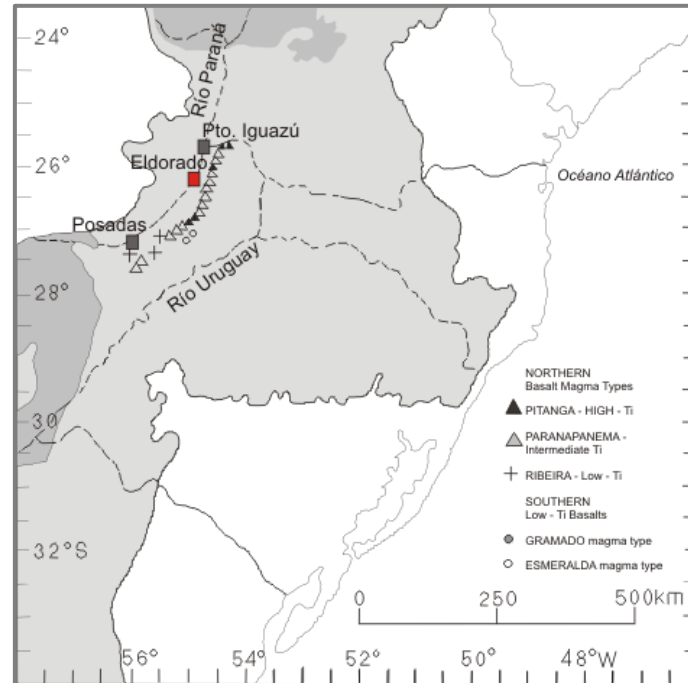


Figura 2.4: Mapa esquemático donde se indican los resultados de las muestras analizadas por Peate *et al.* (1992) correspondientes al territorio de la Provincia de Misiones. El rectángulo rojo señala la zona de estudio (Eldorado). Los magmas identificados por estos autores pertenecen a los tipos Pitanga, Paranapanema, Ribeira y Esmeralda. A estos antecedentes se agregan los tipos Gramado y Urubici (no indicados en la figura), reconocidos en el sur de la provincia (San Ignacio), por Lagorio y Leal (2005) y por Lagorio y Vizán (2011), respectivamente. Modificado de Peate *et al.* (1992): 132 y 133.

Geología física de los derrames de la Formación Serra Geral

Los procesos físicos ocurridos durante el emplazamiento de las provincias de CFB, tales como mecanismos fisurales, emplazamiento de flujos y mecanismos de desgasificación, han sido menos estudiados que otros aspectos vinculados con estos grandes volúmenes de lava (estratigrafía química de los derrames, fuentes mantélicas, tipos de contaminación, modelos tectónicos, etc.) (Self *et al.* 1997).

Basados en observaciones realizadas esencialmente en la Provincia de Columbia River Flood Basalt (Washington, USA) y de Deccan (India), Self *et al.* (1997) postularon que la mayoría de los basaltos de inundación continental habrían sido emplazados predominantemente como campos de derrames laminares (*sheet flow*) pahoehoe compuestos, por medio de un mecanismo térmicamente eficiente denominado inflación (*inflation*).

La inflación es un proceso de crecimiento endógeno que de acuerdo a Pasquarè *et al.* (2008) fue inicialmente planteado por Anderson (1910) y posteriormente profundizado por Walker (1991) y Hon *et al.* (1994). Según describen Self *et al.* (1997), el proceso comienza con un derrame poco espeso que crece a partir de un núcleo que se mantiene caliente y

fluido gracias al aislamiento térmico de una capa parcialmente enfriada y viscoelástica que rodea al flujo. Al cabo de poco tiempo, comienza a formarse sobre el techo de esta capa una corteza que se fractura tanto por la contracción del enfriamiento como por la tracción del movimiento. La continua inyección de lava causa el crecimiento de la corteza quebradiza y, si el rango de inflación es alto, es posible que la lava líquida rompa desde dentro el lóbulo inflado, formando un nuevo lóbulo (*breakout*). Mientras ocurre el influjo de lava nueva y por enfriamiento, se definen en el interior del derrame, las cortezas superior y basal. El enfriamiento y cristalización del núcleo tiene lugar sólo después que el flujo se ha detenido. Este proceso da como resultado flujos que presentan rasgos de superficie *pahoehoe*, una estructura interna tripartita y otros caracteres diagnósticos tales como patrones vesiculares, estilos de juntas y texturas petrográficas (Figura 2.5).

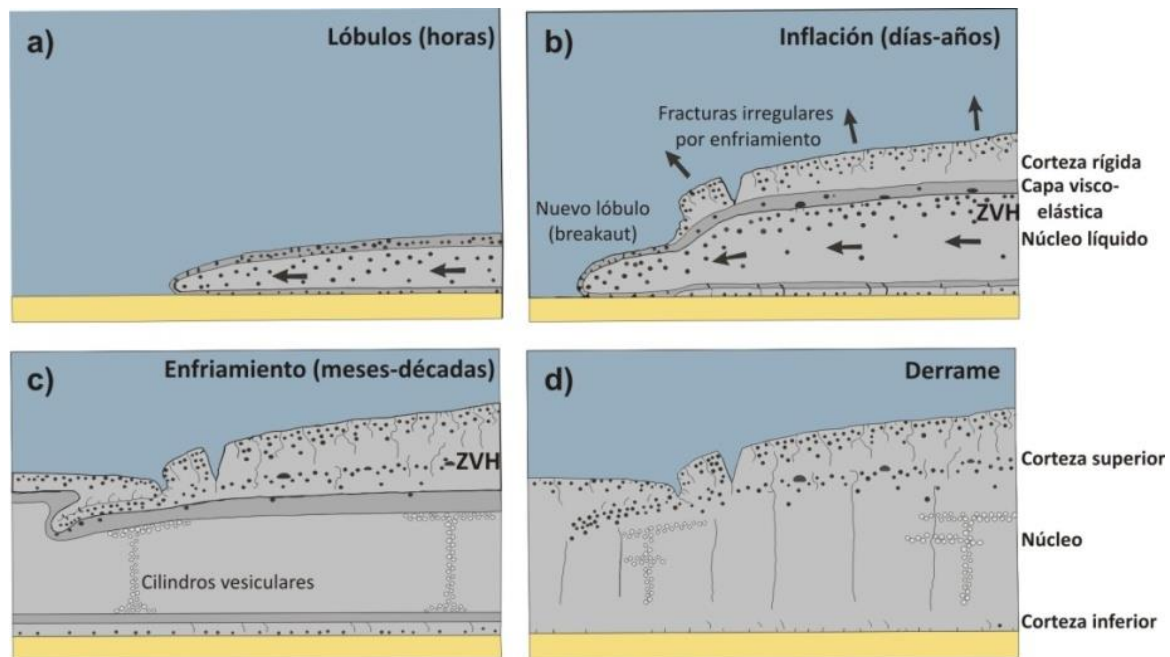


Figura 2.5: Estadios del emplazamiento de un flujo pahoehoe inflado. (a) Inicialmente las burbujas de volátiles se encuentran atrapadas en el flujo entre el nivel superior y el nivel basal. (b) Las burbujas crecen desde el núcleo fluido hacia el nivel viscoelástico formando zonas vesiculares horizontales (ZVH) en la base de la corteza superior. En este estadio también la corteza superior se diaclasa irregularmente debido a la contracción y a la tracción del movimiento durante la inflación. (c) Cuando el flujo se detiene, ascienden hacia la corteza superior, materiales vesiculares segregados desde el fundido remanente que luego quedan preservados como cilindros vesiculares y niveles horizontales dentro del núcleo en cristalización. El enfriamiento lento y estanco favorece la formación de patrones de diaclasamiento regular. (d) La historia de emplazamiento del derrame queda registrada a través de la distribución de vesículas y de los patrones de diaclasamiento. Esquema y referencias descriptivas modificadas de Self *et al.* (1997): 403.

Al igual que en otras provincias de CFB, la volcanología física de Paraná - Etendeka, hasta el momento, ha sido poco investigada. Los antecedentes de estudios focalizados en la morfología y estructura de estos derrames, son escasos y recientes comparados con las publicaciones que existen sobre temas geoquímicos y geocronológicos (Waichel 2006 y Frank 2008).

En la región, son pioneras en este campo las investigaciones de Waichel *et al.* (2006), realizadas en el oeste del estado de Paraná, Brasil. Estos autores examinaron la geología física de la FSG, para lo cual utilizaron definiciones procedentes de estudios semejantes,

efectuados en Hawaii y en las provincias de Columbia River Basalt y de Deccan. El desarrollo de los trabajos los llevó a ordenar la terminología antecedente, a los fines de uniformizar las expresiones empleadas en el estudio de los derrames de la FSG (Waichel 2006). En el Cuadro 2.3 se reproducen algunos de los términos adoptados por estos autores.

CUADRO 2.3: Productos eruptivos según la terminología adoptada por Waichel (2006)

| Descripción | | |
|--|--|---|
| Lóbulo (<i>flow lobe</i>) | Cuerpos pequeños con forma de lóbulo en planta que generalmente están rodeados por una corteza enfriada. El término lóbulo se utiliza en la FSG sólo cuando estos rasgos pueden ser delimitados en los afloramientos. Según sus características pueden ser: | |
| | Tipo S (<i>spongy</i>) | Tipo P (<i>pipe vesicle</i>) |
| | Tienen una distribución homogénea de vesículas. | Poseen vesículas en forma de tubo (<i>pipes</i>) en la base y bordes macizos. |
| | También se utiliza la expresión toes, para describir lóbulos pequeños generados por el avance de la lava, semejantes a dedos. | |
| Derrame (<i>lava flow</i>) | Esta expresión se utiliza para describir el producto de una única y continua efusión. Pueden ser compuestos cuando existe aglutinación de varios lóbulos o, simples cuando se trata de un lóbulo único. | |
| Campo de derrames (<i>flow field</i>) | Término utilizado para denominar un conjunto de derrames generados por un único evento eruptivo. La identificación de los campos de derrames requiere en general, trabajos a escala regional. | |

Los estudios de Waichel *et al.* (2006) identificaron en el estado de Paraná (Brasil) derrames *pahoehoe* y *aa*, con predominio de *pahoehoes* simples y compuestos. Dentro de los derrames compuestos determinaron lóbulos tipo P (*pipe*) y tipo S (*spongy*). Los derrames descriptos presentan características típicas de flujos inflados relacionados con bajas tasas de efusión. Las coladas tienen una extensión lateral de hasta 50 km y fueron reconocidas en ellas tres porciones de acuerdo a su posición con respecto al conducto: proximal (40-70 m de espesor), mediana (20 a 30 m de espesor) y distal (hasta 5 m de espesor). Waichel *et al.* (2006) estimaron un período de 33 meses para la generación de flujos inflados de 25 m de espesor. Rasgos semejantes fueron reconocidos también en los estados de Río Grande do Sul y Santa Catarina (Waichel 2006).

Los resultados de estos trabajos sugieren la superación del modelo clásico que considera a la FSG como un apilamiento de sucesivos derrames con geometría tabular (Waichel 2006). Es de esperar que la realización de más estudios de detalle enfocados en estos temas, consoliden a la geología física como una herramienta imprescindible para el establecimiento de correlaciones estratigráficas en estas lavas. Al respecto, es oportuno mencionar que los magmas tipo reconocidos por Peate *et al.* (1992), no representan unidades estratigráficas como las establecidas en otras provincias de CFB (Peate 1997). Ellos constituyen paquetes de derrames geoquímicamente distintos y emplazados eventualmente de manera diacrónica, con lo cual su evolución geocronológica, petrogenética y litogeoquímica probablemente no haya sido lineal para toda la FSG (Arioli 2008).

Estudios en este campo parecen ser esenciales también para comprender y resolver cuestiones vinculadas con los recursos hídricos subterráneos. Dan cuenta de ello, por ejemplo, trabajos como los de Fernandes *et al.* (2010) que combinan estudios de geología

física, petrografía y geoquímica para investigar el rol de los basaltos de Serra Geral como conexión hidráulica entre la superficie y el Sistema Acuífero Guaraní. Otro caso de aplicación es el estudio de Frank (2008), que integra características físicas y geoquímicas para evaluar aspectos genéticos y patrones de distribución de los minerales secundarios alojados en las cavidades que comúnmente están presentes en estas rocas.

Por último, se debe mencionar que los estudios de volcanología física de las provincias de CFB son considerados fundamentales para comprender el estilo eruptivo de estos enormes eventos y dimensionar el impacto paleoambiental de su ocurrencia, en relación con las extinciones en masa documentadas en la historia geológica de nuestro planeta (Self *et al.* 1997).

Los estudios previos hasta aquí reseñados se consideran básicos para la caracterización local de los aspectos petrológicos y geoquímicos de la Formación Serra Geral. La utilización de los mismos está profusamente reflejada en la literatura geológica brasileña y también cuenta con ejemplos en el país, entre los que se destacan las contribuciones de Lagorio y Leal (2005a) y Lagorio y Vizán (2011) sobre la geoquímica de la Formación de Serra Geral en la provincia de Misiones y el trabajo de Mena *et al.* (2006), que aborda aspectos paleomagnéticos y geoquímicos de los basaltos del Paraná en Misiones.

Geología local

Antecedentes de estudios geológicos en Misiones

En contraste con los amplios antecedentes que existen sobre el estudio de la geología de la región, particularmente en Brasil, el conocimiento geológico del NE de Argentina se encuentra aún poco desarrollado. No obstante los avances producidos en la última década, la mayor parte de los trabajos tienen ya varios años y muchos de ellos son inéditos. A continuación se mencionan cronológicamente los estudios previos más difundidos, presentando con mayor detalle aquellos que han sido utilizados para la caracterización geológica de la zona de Eldorado.

Las primeras observaciones sobre la geología de Misiones provienen de descripciones realizadas por naturalistas viajeros durante el siglo XIX. Las tareas de exploración emprendidas por aquel entonces estaban destinadas a describir la naturaleza de nuestro país y sus recursos, compendiando en simultáneo, datos físicos, biológicos, socioculturales y geográficos. Para el período 1880-1900, se pueden mencionar las descripciones geológicas contenidas en las publicaciones sobre Misiones efectuadas por Lista (1883), Holmberg (1887) y Burmeister (1899).

Años más tarde, en las primeras décadas del siglo veinte, se llevaron a cabo algunos estudios geológicos bajo la órbita del Ministerio de Agricultura de la Nación. Fourous (1904) realizó un reconocimiento geológico de Misiones con el principal objetivo de constatar la existencia de carbón mineral en el departamento de San Javier. Stappenbeck (1914), ejecutó perforaciones en las localidades de Posadas, Cerro Corá, Loreto, Colonia Azara, Candelaria y Garupá (Zaimán). Hausen (1919), estudió muestras de estas

perforaciones junto a otras recogidas, en esa misma época, por un coleccionista de la Dirección General de Minas, Geología e Hidrología y complementó este trabajo con un viaje de reconocimiento cuyos resultados presentó como una contribución a la petrografía del Territorio Nacional de Misiones.

En los años subsiguientes se ejecutaron otros trabajos entre los que se pueden mencionar el reconocimiento geológico del Territorio de Misiones efectuado por Angelelli (1937) y el aporte al conocimiento de la petrografía de las rocas ígneas de Misiones realizado por Teruggi (1955). El trabajo de Angelelli, encomendado por Obras Sanitarias de la Nación, tuvo por objetivo constatar la existencia de yacimientos de bauxita, lo cual fue desestimado por este autor después de haber explorado el territorio misionero en toda su longitud y dos veces transversalmente en las regiones austral y septentrional (Angelelli 1937, p.22). Por otra parte, Teruggi (1955), a partir del estudio de un centenar de muestras procedentes de distintos lugares de la provincia (Posadas, Cerro Corá, Puerto Aguirre, Cataratas del Iguazú, Río Iguazú, Bernardo de Irigoyen, San Pedro, Mártires, Yabebiry, Leoni, márgenes de los arroyos Aguaray Guazú, Piray Guazú, Acaraguá, Piray Miní, Urugua-í, etc. citados en Teruggi 1955, p. 260), ubicó a las rocas ígneas de Misiones dentro de las asociaciones tholeíticas de Turner y Verhoogen (1951) (citado en Teruggi 1955, p. 260) y dentro de la gran provincia petrográfica denominada cuenca del Paraná. Asimismo, Teruggi (1955) propuso abandonar el uso de las denominaciones meláfiro, espilita, dolerita, etc., utilizadas hasta entonces en las descripciones de estas rocas, por la simple denominación de basaltos o diabasas (Teruggi 1955, p. 262).

A principios de 1960, el gobierno de la recientemente creada Provincia de Misiones (1953), encomendó a la Compañía Argentina de Relevamientos Topográficos y Aerofotogramétricos (C.A.R.T.A.) la ejecución del relevamiento aerofotogramétrico de todo el territorio provincial (29.801 km²) y la evaluación de sus recursos naturales mediante tareas de fotointerpretación (Stefañuk 1991).

Para tal fin, la compañía realizó trabajos topográficos y vuelos para la obtención de fotografías aéreas, las cuales sirvieron de base para la ejecución de estudios geológicos, edafológicos y forestales. C.A.R.T.A. confeccionó hojas topográficas a escala 1:10.000 con curvas de nivel equidistantes a 5 metros en la zona de campo y colonias más pobladas, y a escala 1:20.000 y equidistancia de 20 metros para las zonas del este y nordeste de Misiones que, en ese entonces, se encontraban más despobladas y presentaban cobertura selvática (Stefañuk 1991). El trabajo incluyó además la realización de un inventario forestal y de estudios sobre la edafología y la geología de toda la provincia, información que fue presentada por cada tema, en 90 hojas 1:50.000, respectivamente.

Los estudios geológicos tuvieron un tiempo de ejecución de tres años (desde diciembre de 1961 hasta diciembre de 1964) y fueron efectuados por una firma italiana (GEOMAP S.A.) que actuó como consultora para C.A.R.T.A. Los trabajos realizados por GEOMAP S.A. en Misiones abarcaron relevamientos geológicos expeditivos, sistemáticos y selectivos (de Julio a Noviembre de 1962 y de Mayo a Agosto de 1963), toma de muestras para estudios petrográficos y análisis químicos (628 muestras en total) y observaciones geofísicas

llevadas a cabo a través de una red magnetométrica de reconocimiento (2.160 km). Los análisis petrográficos, mineralógicos y químicos fueron efectuados en Italia por investigadores del Instituto de Mineralogía de la Universidad de Pisa y consistieron en 7 análisis químicos completos, 179 descripciones de secciones delgadas y 64 exámenes petrográficos a reflexión (C.A.R.T.A. 1964). La fotointerpretación y la cartografía definitiva con escala 1:50.000 fueron efectuadas en el estudio geológico GEOMAP S.A. de Florencia entre 1962 y 1963 (C.A.R.T.A. 1964). El informe geológico que reúne los resultados obtenidos fue concluido en 1964 y constituye un documento inédito. El bosquejo geológico presentado por C.A.R.T.A - GEOMAP S.A da cuenta de la existencia en la provincia de cuatro tipos litológicos denominados como “areniscas continentales mesozoicas, efusivas básicas, terrenos residuales (lateritas) y sedimentos aluvionales antiguos y recientes” (C.A.R.T.A. 1964, p. 24). Hasta la fecha y con más de 50 años, estos estudios son las únicas referencias cartográficas (escala 1: 50.000) que abarcan todo el conjunto de las rocas aflorantes en el territorio de Misiones. Como tales, y al igual que las hojas topográficas y edafológicas, se trata de antecedentes que actúan, aún hoy, como información de apoyo en muchas intervenciones prácticas.

Durante el desarrollo de los estudios de C.A.R.T.A. y en las décadas siguientes, también tuvieron lugar en la provincia otros trabajos geológicos de diversa índole. Entre publicados e inéditos, se pueden citar, por ejemplo, el informe sobre el mineral de hierro en la provincia de Misiones de Fernández Lima y De la Iglesia (1963), la contribución sobre la meteorización de basaltos en Misiones de Riggi y Feliú de Riggi (1964), la propuesta estratigráfica efectuada para la Mesopotamia por Gentili y Rimoldi (1979), el informe sobre la búsqueda de Tierras Raras en Misiones de Technostone S.P.A. (1989), promovido por el gobierno nacional y financiado por la Comunidad Económica Europea, entre otros. También se pueden mencionar aportes puntuales sobre hallazgos mineralógicos realizados en muestras colectadas en la zona de Eldorado (Latorre y Vattuone de Ponti 1985 y 1986 y Cortelezzi *et al.* 1987).

Con respecto a los trabajos inéditos es importante señalar que existen en la provincia y países limítrofes, numerosos antecedentes geotécnicos derivados en su gran mayoría de estudios geológicos realizados para la construcción de aprovechamientos hidroeléctricos y grandes puentes. La elaboración de este tipo de estudios comenzó en la década de 1960, tuvo especial desarrollo en los 70' y 80' y continúa en la actualidad.

En épocas más recientes, desde la segunda mitad de los años 90' y fundamentalmente a partir de la década de los 2000, el Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) emprendió la ejecución de varios proyectos en Misiones. Las tareas desarrolladas permitieron la publicación del Mapa Geológico de la Provincia de Misiones a escala 1:500.000 (1999); la elaboración de la Carta Geoambiental de la localidad de San Ignacio a escala 1:35.000 (2005) y, la determinación de tres sitios de interés geológico que fueron incluidos en el libro Sitios de Interés Geológico de la República Argentina presentado en 2008. Se deben mencionar también las tareas ejecutadas por el SEGEMAR para la elaboración de las Cartas Geológicas 2754-III Oberá y 2757-IV Posadas a escala 1: 250.000, las cuales aún no fueron publicadas.

Finalmente, el panorama de antecedentes seleccionados para esta síntesis se completa con las últimas contribuciones realizadas sobre la geología del área de San Ignacio (Marengo y Net 2004, Marengo y Palma 2005, Marengo *et al.* 2005), sobre la geología del área de Eldorado (Ciccioli *et al.* 2005), sobre niveles peperíticos intercalados en la FSG (Lagorio y Leal 2005b), sobre aspectos paleomagnéticos y geoquímicos de la FSG (Mena *et al.* 2006) y sobre la geoquímica de la FSG en la Provincia de Misiones (Lagorio y Leal 2005a y Lagorio y Vizán 2011).

Materiales y métodos

Búsqueda bibliográfica

Los estudios destinados a la caracterización geológica de la zona de Eldorado se iniciaron con la búsqueda de antecedentes bibliográficos y cartográficos, tanto locales como regionales. El análisis y sistematización de esta información orientó el desarrollo de las etapas posteriores, las cuales incluyeron trabajos de gabinete y jornadas de campo. Los procedimientos ejecutados durante el desarrollo de los mismos se describen a continuación.

Procesamiento digital de antecedentes cartográficos y utilización de imágenes satelitales

Se utilizaron cartas del IGM, hojas topográficas, geológicas, edafológicas y fotografías aéreas de C.A.R.T.A. (1963), imágenes Lansat (ETM y TM) y Google Earth. En el Cuadro 2.4 se dan detalles de los antecedentes referidos.

| CUADRO: 2.4: Antecedentes cartográficos georeferenciados y digitalizados | | | | |
|---|---------------|-------------|--|------------|
| Antecedentes | Escala | Año | Denominación | |
| CARTA TOPOGRÁFICA IGM | 1:250.000 | 1975 | Eldorado | 2754-I |
| CARTA TOPOGRÁFICA IGM | 1:100.000 | 1993 | Pto. Esperanza | 2754-2 |
| CARTA TOPOGRÁFICA IGM | 1:100.000 | 1993 | Eldorado | 2754-8 |
| HOJAS TOPOGRÁFICAS C.A.R.T.A. | 1:10.000 | 1962-1963 | Varias (29 Hojas) | |
| HOJA GEOLÓGICA C.A.R.T.A. | 1:50.000 | 1962-1963 | Pto. Delicia | 2754-2-4 |
| HOJA GEOLÓGICA C.A.R.T.A. | 1:50.000 | 1962-1963 | Eldorado | 2754-8-1-2 |
| HOJA EDAFOLÓGICA C.A.R.T.A. | 1:50.000 | 1962-1963 | Pto. Delicia | 2754-2-4 |
| HOJA EDAFOLÓGICA C.A.R.T.A. | 1:50.000 | 1962-1963 | Eldorado | 2754-8-1-2 |
| FOTOS AÉREAS C.A.R.T.A. | 1:33.000 | 1962-1963 | 31 Fotos de las Corridas N° 82, 83, 84, 85, 86, 87, y 88a. | |
| IMAGEN LANSAT (ETM Y TM) | | AGOSTO 2000 | | |
| IMAGEN GOOGLE EARTH | | 2008-2010 | | |

Toda la información fue georeferenciada (Proyección Gauss Krüger, Faja 7, Campo Inchauspe) y digitalizada. Posteriormente se armaron mosaicos y un modelo digital de elevación. Las imágenes Lansat fueron utilizadas para realizar interpretaciones visuales por medio de algunos procesos básicos (Brovey RGB432+PAN, Brovey RGB542+PAN y TCap+PAN y algoritmo de lineamientos) y las imágenes Google Earth para delimitar rasgos planimétricos. Estas tareas se realizaron en el Instituto de Recursos Minerales de la FCNyM (UNLP), con los programas Er Mapper 6.4 y Autocad.

Los antecedentes digitalizados junto con los datos generados durante los trabajos de campo, fueron organizados para su manejo, interpretación y representación por medio del uso del software Arcview 3.3.

Trabajo de campo

Relevamiento y selección de lugares de muestreo

La zona de estudio está predominantemente cubierta por suelos lateríticos y por bosques nativos e implantados. Los afloramientos naturales de la Formación Serra Geral son escasos y se circunscriben a las proximidades del río Paraná y a las márgenes de los principales cursos de agua donde existen frentes de exposición que incluyen algunos saltos y cascadas.

Las etapas iniciales del trabajo de campo consistieron en el relevamiento de sitios con posibilidades de descripción de perfiles y extracción de muestras. Las mejores oportunidades en este sentido se encontraron en los cortes de roca de las principales rutas (RN 12 Y RP 17) y en canteras comerciales, en funcionamiento y abandonadas. Se seleccionaron seis frentes de exposición (PE-1 a PE-6) donde se efectuó la descripción de los perfiles y se tomaron muestras en sentido vertical que incluyeron niveles de alteración y suelos.

La última etapa de los trabajos de campo consistió en la realización de controles enfocados a verificar la información obtenida a través de los antecedentes y del uso de imágenes satelitales. Para ello se utilizó como base el mapa geológico de C.A.R.T.A. (1962 - 1963) de escala 1:50.000 (Hojas 2754-2-4 y 2754-8-2). La cobertura de la zona se estructuró a partir de la red caminos e incluyó el relevamiento y descripción de los afloramientos hallados. Los chequeos de campo se completaron con el recorrido en canoa de aproximadamente 6 km del arroyo Piray Guazú. Toda la información obtenida en esta etapa fue registrada por medio de un equipo GPS Trimble Juno ST Handheld y representada en formato digital mediante la utilización del software Arcview 3.3.

Criterios para la identificación y descripción de los derrames de basaltos de la FSG

Para la identificación y descripción de los derrames, inicialmente se utilizaron los antecedentes de C.A.R.T.A 1962 - 1963 y los criterios de Leinz (1949). Posteriormente y de manera complementaria, se procuró el reconocimiento de rasgos litológicos, estructuras y otros caracteres diagnósticos como patrones vesiculares, patrones de diaclasamiento, etc., conforme a los nuevos modelos adoptados en la región para la descripción de la FSG (por ejemplo: Arioli, 2008, Fernandes *et al.* 2010, Waichel 2006, Waichel *et al.* 2006, entre otros). A continuación se sintetizan las características más destacadas de cada uno de estos enfoques.

Criterios utilizados por C.A.R.T.A - GEOMAP S.A para efectuar la separación estratigráfica y la representación cartográfica de los derrames de la FSG en Misiones

Como fuera señalado precedentemente, el bosquejo geológico presentado por C.A.R.T.A - GEOMAP S.A, da cuenta de la existencia, a nivel provincial, de cuatro tipos litológicos denominados como “areniscas continentales mesozoicas, efusivas básicas, terrenos residuales (lateritas) y sedimentos aluvionales antiguos y recientes” (C.A.R.T.A. 1964, p. 24).

Con respecto a las efusivas básicas el informe alude a varias coladas superpuestas e indica que “cada una de las coladas está formada por una zona central dura y compacta y dos zonas llenas de vacuolos y escoriáceas (...) situadas en el lecho y techo de ella” (C.A.R.T.A. 1964, p. 33) y que “la del techo presenta siempre vacuolos más desarrollados porque los gases disueltos en el magma encontraron menor resistencia a la salida liberándose en mayor cantidad” (C.A.R.T.A. 1964, p. 33).

Señala además la existencia de un “marcado contraste topográfico que caracteriza a las unidades estratigráficas más espesas y más duras, en oposición al aspecto morfológico de las intercalaciones de escorias poco resistentes a la erosión” (C.A.R.T.A. 1964, p. 34). Este rasgo fue utilizado en el mencionado estudio, para realizar, a través de medios de fotointerpretación, correlaciones geométricas que fueron “controladas con las muestras recogidas y el estudio petrográfico a través de toda la Provincia” (C.A.R.T.A. 1964, p. 34).

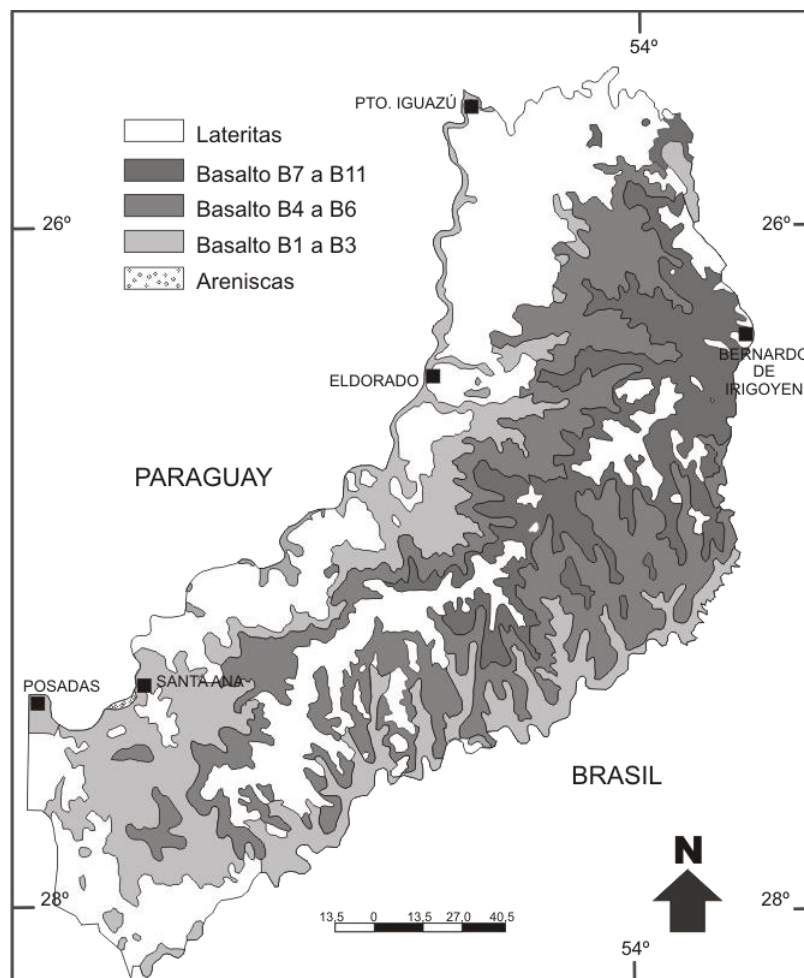


Figura 2.6: Bosquejo geológico del trabajo de C.A.R.T.A - GEOMAP S.A 1964. La figura original (C.A.R.T.A. 1964) fue modificada para su reproducción.

De esta forma se distinguieron once unidades estratigráficas denominadas como $\beta 1$ a $\beta 11$ (Figura 2.6), cada una de las cuales incluye varias coladas (C.A.R.T.A. 1964, p. 52). Al respecto, el informe señala también que “las unidades estratigráficas efusivas se presentan continuas sobre grandes distancias y en posición subhorizontal” (C.A.R.T.A. 1964, p. 23) y que “la disposición estructural bastante llana y el escaso rechazo vertical (...) determinan

condiciones favorables para establecer una estratigrafía detallada como la adoptada, a pesar de la aparente monotonía litológica de las volcanitas” (C.A.R.T.A. 1964, p. 31).

Con relación a la disposición estructural de la región el informe indica que “en todo el área cubierta por el estudio no se notan fallas con fuerte rechazo vertical, aunque abundan grandes fracturas con escaso rechazo y sistemas de diaclasas que se han desarrollado a veces sobre grandes distancias” (C.A.R.T.A, 1964, p. 36). Por medio de fotointerpretación el trabajo presenta un mapa con el campo total de lineaciones de todo el territorio a partir del cual fueron establecidos tres sistemas que, en orden de predominio, corresponden a las direcciones E-W, NW-SE y NE-SW, respectivamente.

Resulta de lo dicho hasta aquí, que el modelo concebido por C.A.R.T.A. (1964) para representar el conjunto de derrames basálticos aflorantes en Misiones, corresponde al clásico apilamiento de coladas subhorizontales con geometría tabular, las cuales, debido a la falta de desplazamientos verticales importantes, habrían preservado su disposición original.

Criterios utilizados por Leinz (1949) para la descripción de la morfología de los derrames de la FSG

El modelo propuesto por Leinz (1949) constituye la descripción clásica de la morfología física de los basaltos de la FSG. Este modelo concibe a los derrames como cuerpos tabulares provistos de una estructura interna dada por la ocurrencia de diferentes niveles. Dichos niveles se reconocen básicamente a partir de la observación de variaciones en la estructura de la roca (basaltos vesiculares, amigdaloides y masivos) y de diferencias en el diaclasamiento. De acuerdo con estas variaciones el perfil ideal de una colada basáltica (Cuadro 2.5) estaría compuesto de la siguiente forma:

CUADRO 2.5: Esquematización de un derrame basáltico según el modelo propuesto por Leinz (1949).

| ZONA DEL PERFIL | ESTRUCTURA INTERNA | DIACLASAMIENTO |
|------------------|--|--|
| SUPERIOR O TECHO | Basalto vesicular Basalto amigdaloides Basalto microcristalino | Diaclasamiento horizontal |
| CENTRAL | Basalto microcristalino a macrocristalino | Diaclasamiento subvertical a vertical |
| BASAL O PISO | Basalto microcristalino Texturas vítreas | Diaclasamiento horizontal |

Diferentes niveles dentro de un derrame basáltico reconocidos básicamente a partir de la observación de variaciones en la estructura de la roca (basaltos vesiculares, amigdaloides y macizos) y de diferencias en el diaclasamiento, según Leinz (1949).

Leinz (1949), también conceptualizó la relación entre la zonalidad interna de los basaltos y la morfología escalonada de las regiones formadas por estas litologías. De acuerdo a este autor, los niveles vesiculares-amigdaloides con diaclasamiento horizontal, tienden a constituir sectores donde la descomposición y la erosión actúan predominantemente de manera horizontal formando niveles con bajas pendientes (“pisos”). Por otra parte, los niveles con fuertes pendientes (“escalones”) estarían asociados a sectores formados por basaltos masivos con diaclasamiento preferentemente vertical, lo cual facilitaría la caída de

bloques según estas discontinuidades. De esta forma, y a través de la acción de procesos de erosión fluvial retrocedente, se explica en muchos casos, la formación de saltos y cascadas que comúnmente se encuentran en los cursos de agua de la región.

Los criterios de Leinz (1949) fueron utilizados en varias investigaciones geológico-geotécnicas realizadas en Misiones, por ejemplo Rimoldi (1978) y (1980), así como también, en la mayoría de los trabajos geotécnicos que incluyen referencias sobre la ocurrencia de coladas sucesivas. En estudios más modernos, tanto aplicados como académicos, estos criterios son utilizados, en muchos casos, junto con la observación de rasgos indicativos de la ocurrencia de derrames lobulados generados por procesos de inflación, por ejemplo, Frank (2008), Fernandes *et al.* (2010), Gonçalves de Lima (2009), entre otros.

Rasgos litológicos, estructuras y otros caracteres diagnósticos utilizados para describir la morfología de los derrames basálticos de la FSG

A fines de complementar las descripciones realizadas según los criterios previamente expuestos, se consideró oportuno incluir también el reconocimiento puntual de algunos caracteres diagnósticos utilizados en la región para la elaboración de la cartografía geológica de la FSG, por ejemplo Arioli (2008).

CUADRO 2.6: Procesos y rasgos litológicos y estructurales de los derrames de basalto tomado de Arioli (2008): p. 82.

| PROCESOS | RASGOS LITOLÓGICOS Y ESTRUCTURALES |
|--|--|
| Enfriamiento | Estructura zonada Disyunción columnar Entablatura (<i>entablature</i>) |
| Flujo | Disyunción tabular sigmoidal Vesículas inclinadas Brechas volcanoclásticas Brechas autoclásticas Brechas de tope |
| Inflación | Juntas de Inflación Disyunción tabular Variaciones composicionales Pliegues Arqueamientos |
| Cristalización | Variaciones texturales Minerales primarios Minerales secundarios Glóbulos de vidrio Relleno de cavidades y fracturas Geodas |
| Segregación y diferenciación magmática | Espiráculos Sills Gabro pegmatoideo Granófiros y riolitas |

Este autor realizó un mapeo de la FSG en la región sudoeste del Estado de Paraná (Brasil), donde definió cuatro asociaciones faciológicas: 1) derrames lobulados de basalto vesicular, 2) derrames tabulares de basaltos masivos, 3) diques y sills diabásicos y, 4) asociaciones de rocas ácidas e intermedias. Para realizar esta división en facies, adoptó la clasificación

morfológica de derrames propuesta por Shaw y Swanson (1970) y revisada por Bronde *et al.* (2004), según la cual los derrames de basaltos son de dos tipos: tabulares o simples y lobulados o compuestos. Los primeros son de gran tamaño y serían el resultado de erupciones persistentes que forman cuerpos tabulares, mientras que los segundos, corresponderían a erupciones rápidas generadoras de flujos lineales o anastomosados. De la variedad de criterios utilizados por Arioli (2008) para la separación de facies de la FSG, se reproducen en el Cuadro 2.6 los aplicados por este autor para la descripción de la estructura interna de los derrames de basaltos, los cuales se basan, entre otros, en una serie de rasgos relacionados con los siguientes procesos: enfriamiento, flujo, inflación, cristalización y segregación magmática.

Finalmente, se procuró considerar también, de manera general y al sólo efecto de ampliar los criterios con los que se realizaron inicialmente las observaciones en el área de estudio, los enfoques seguidos por Fernandes *et al.* (2010), Waichel (2006), Waichel *et al.* (2006). Estos autores adoptaron básicamente la terminología propuesta por Self *et al.* (1997), la cual ya fue precedentemente expuesta en el apartado *Geología física de los derrames de la Formación Serra Geral* en este capítulo.

Estudios y análisis de laboratorio

Inicialmente todas las muestras colectadas fueron descriptas macroscópicamente a los fines de su caracterización y selección para la confección de láminas delgadas y análisis químicos. Fueron escogidas muestras ubicadas en diferentes posiciones con respecto al perfil ideal con diferencias texturales/ estructurales que podían hacer suponer diferencias composicionales.

Se confeccionaron cortes delgados y pulidos sobre los cuales se efectuaron descripciones petrográficas, identificándose las especies mineralógicas y las texturas presentes. Las muestras fueron examinadas en el Laboratorio de Microscopía del Instituto de Recursos Minerales (INREMI – FCNyM – UNLP).

Los análisis por difracción de rayos X (DRX) se realizaron en el Centro de Tecnología de Recursos Minerales y Cerámica (CETMIC – UNLP) con un equipo Philips 3020 con controlador PW3710, radiación Ka-Cu y filtro de Ni a 40 kV-20 mA. Los mismos consistieron en la obtención de difractogramas sobre muestra total en polvo. Los minerales de la fracción granulométrica fina (menor de 2 μ m) se determinaron sobre muestra en polvo y orientada (seca, glicolada y calcinada a 550°C-2h) y saturadas con K y Mg.

Las concentraciones de elementos mayoritarios y trazas fueron medidas en el Laboratorio de la Università Degli Studi di Trieste, Italia. Las rocas analizadas fueron clasificadas de acuerdo con sus elementos mayoritarios (Irvine y Barajar 1971, Le Bas *et al.* 1986 y Miyashiro 1974) y según la propuesta de magmas tipo de Peate *et al.* (1992).

Resultados

Los procedimientos descriptos previamente permitieron obtener los resultados que a continuación se presentan.

Características de los afloramientos seleccionados

Descripción de los frentes de exposición muestreados

En el área de estudio afloran los derrames de la FSG junto con formaciones de suelos rojos; aluviones y sedimentos recientes. De los seis frentes de exposición descritos y muestreados (PE-1 a PE-6), sólo dos (PE-1 y PE-5) permitieron el reconocimiento de variaciones verticales que fueron consideradas de acuerdo con los criterios previamente mencionados. Las características más destacadas de cada frente se resumen en el Cuadro 2.7.

En PE-1 se reconocieron, de base a techo, basaltos vesículo – amigdalares (BVA), brechas basálticas (BB) y basaltos masivos (BM) (Figura 2.7). Los basaltos vesículo – amigdalares (BVA) se sitúan en la base del perfil expuesto en la cantera y se observan de manera restringida en comparación con los niveles de basaltos masivos (BM), los cuales se ubican en el tope de la secuencia y actualmente se encuentran en explotación para la producción de áridos. Ambos están separados entre sí por un nivel discontinuo y de espesor variable constituido por una roca de aspecto brechoso.

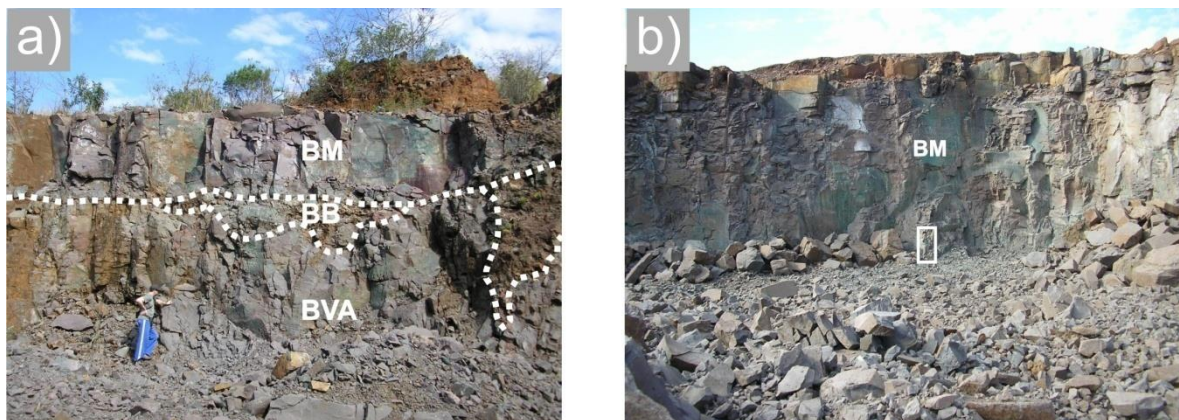


Figura 2.7: Perfil PE-1. a) Contacto entre basalto vesículo amigdalares (BVA), brecha basáltica (BB) y basalto masivo (BM), indicado de manera esquemática con la línea de trazos blancos. b) Sector de la cantera en el que sólo está expuesto el BM. El rectángulo blanco (persona) referencia la escala.

El nivel BVA contiene vesículas y amígdalas que varían en tamaño, forma y cantidad según la posición dentro de la secuencia. El relleno de las amígdalas en general es de color verde en las paredes de las mismas y de color blanco hacia el centro (Figura 2.8). Este nivel exhibe, en algunos sectores, un diaclasamiento de tipo horizontal con separaciones que tienen entre 15 y 20 cm y permiten reconocer cierta regularidad.

El nivel BM presenta en el afloramiento diferentes coloraciones presumiblemente derivadas de procesos de alteración. Los colores rojizos violáceos prevalecen en el sector basal, los verdosos dominan la parte media y superior, y los pardos amarillentos las posiciones próximas al destape (Figura 2.9). En este nivel fueron observadas diaclasas verticales a subverticales reconocidas como de tipo columnar en el sector basal y como entabladura sigmoidal en el sector superior de la secuencia.

En PE-5 se identificaron dos niveles masivos (BM₁ y BM₂) y un espeso nivel vesículo amigdalares (BVA). El destape, como en otros casos, está compuesto por basalto alterado

que pasa a suelo colorado en el tope con un espesor promedio de 1,50 m. La apertura de este frente data de la década de 1940 estando su actividad actual muy reducida.



Figura 2.8: Perfil PE-1. a) Nivel vesículo amigdalario situado en la base del perfil. En algunos sectores se observó que, de piso a techo, las vesículas disminuyen de tamaño, pasan de formas irregulares a subesféricas y aumentan en cantidad. b) Basalto amigdalario con vesículas de forma irregular, rellenas con minerales de color verde (predominantes) y blanco (hacia el centro de las cavidades).

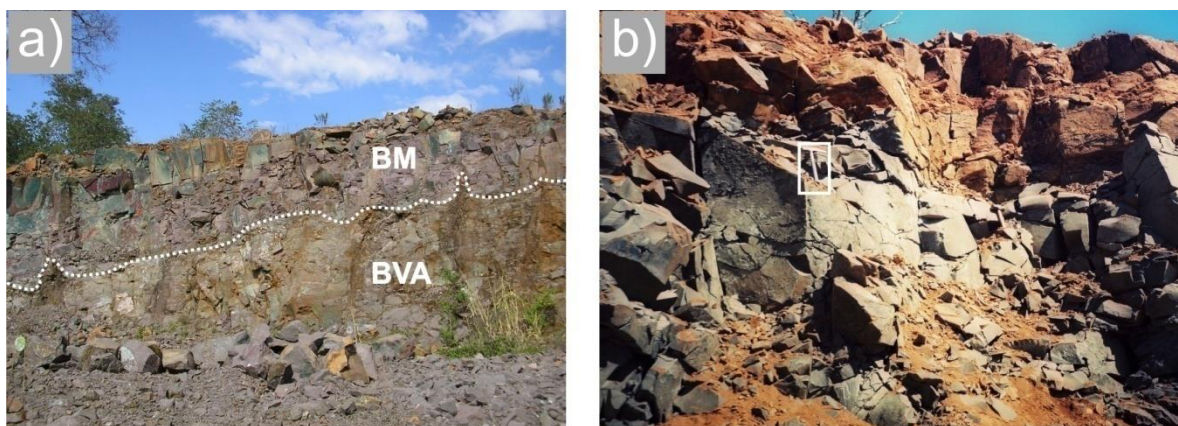


Figura 2.9: Perfil PE-1. a) Diferentes coloraciones en BM. Los colores rojizos violáceos prevalecen en el sector basal (sobre el contacto indicado con la línea punteada blanca) y los verdosos dominan la parte media y superior. b) Colores pardos amarillentos observados en las posiciones próximas al destape. El rectángulo blanco (piqueta) referencia la escala.

Los niveles masivos (BM_1 y BM_2) se ubican en la base y techo de la secuencia. BM_1 es un basalto gris que presenta matices rojizos, grano fino y muy escasas amígdalas que son, en general, pequeñas y revestidas con minerales de color verde. El basalto BM_2 se caracteriza en cambio, por coloraciones más bien verdosas, mayor densidad que BM_1 y por una estructura completamente masiva. El diaclasamiento mejor observado corresponde al nivel BM_2 , el cual presenta fracturación de tipo horizontal en el sector basal del mismo y vertical en sector superior, próximo al tope de la secuencia.

CUADRO 2.7: Principales características de los frentes de exposición descriptos y muestreados.
PE= perfil expuesto en cantera; BVA= basalto vesículo amigdalar; BM= basalto masivo y BB= nivel brechoso

| Espesor de la roca expuesta | |
|---|---|
| PE-1 | Frente de explotación (en actividad) de 5 a 7 m de altura. La roca expuesta puede llegar hasta los 15 m en otros sectores de la cantera. |
| PE-2 | Frente de explotación (abandonado) de aproximadamente 8 m (roca basáltica) y 3 m (basalto meteorizado y suelos lateríticos). |
| PE-3 | Frente de explotación (en actividad) de aproximadamente 12 m. |
| PE-4 | Frente de explotación (abandonado e inundado) con dos bermas de 3 a 5 m de altura aproximadamente. |
| PE-5 | Frente de explotación (con actividad parcial) de aproximadamente 12 a 15 m de altura aproximadamente. |
| PE-6 | Frente de explotación (abandonado) de 4 a 5 m de altura. |
| Niveles vesículo - amigdalares (BVA) | |
| PE-1 | Nivel BVA situado en la base del afloramiento expuesto a partir del frente de explotación. |
| PE-2 | No fueron observados. |
| PE-3 | No fueron observados. |
| PE-4 | No fueron observados. |
| PE-5 | Nivel BVA situado entre dos niveles de basaltos masivos. Presencia de vesículas y amígdalas alongadas con diámetros horizontales de cm a dm. |
| PE-6 | BVA observado en el piso de la cantera. |
| Tipo de diaclasamiento | |
| PE-1 | Diaclasamiento horizontal en el nivel BVA; diaclasamiento vertical en el nivel BM: columnar (sector basal) y entabladura sigmoidal (sector superior). |
| PE-2 | Diaclasamiento vertical |
| PE-3 | Diaclasamiento vertical con presencia de superficies curvilineales del tipo entabladura sigmoidal |
| PE-4 | Diaclasamiento vertical |
| PE-5 | Diaclasamiento horizontal (sector basal) y vertical (sector superior) en el nivel BM ₂ ubicado en el tope del frente expuesto. |
| PE-6 | No fue observado |
| Muestreos realizados | |
| PE-1 | CELD 001 (BVA), CELD 002 (BB), CELD 004 (BM), CELD 005 (BM) |
| PE-2 | CELD 009 (BM), CELD 010 (BM), CELD 011 (dique) |
| PE-3 | CELD 006 (BM), CELD 007 (BM) |
| PE-4 | CELD 008 (BM) |
| PE-5 | CELD 016 (BM ₁), CELD 015 (BVA), CELD 014 (BM ₂) |
| PE-6 | CELD 017 (BM), CELD 018 (BM) |

El nivel BVA, situado entre BM₁ y BM₂, es de color gris con tonalidades rojizas y verdosas y está caracterizado por la presencia de numerosas vesículas y amígdalas cuyos tamaños y formas presentan variaciones (Figura 2.10 a y b). Las cavidades más grandes alcanzan dimensiones decimétricas y las menores van de unos pocos centímetros a milímetros. Las primeras son en general alargadas según el eje horizontal y, entre las segundas, se encuentran formas subesféricas e irregulares. En la cantidad y coloración del relleno también existen diferencias. Se observaron amígdalas rellenas con un material blando, de color verde claro, que en algunos casos ocupa totalmente las cavidades llegando a sobresalir con respecto a la superficie de la roca (similar a motas o gránulos). En otros casos, el material verde sólo tapiza la base de las vesículas, las cuales están ocupadas por un mineral de color blanco, blando, con brillo vítreo y con notables planos de clivaje. Se observaron también, cavidades tapizadas por los mencionados materiales verdes seguidos por una mineralización de color blancuzco y hábito botroidal.

Latorre y Vattuone de Ponti (1985); (1986) y Cortelezzi *et al.* (1987) estudiaron las especies minerales que ocupan las cavidades (amígdalas y diaclasas) de los basaltos expuestos en PE-5. El interés por estos materiales surgió a partir del hallazgo de algunas zeolitas y otros minerales (apofilita, chabasita y baritina asociada a basaltos), los cuales fueron estudiados debido a que, hasta ese momento, no habían sido citados en nuestro país. En el Cuadro 2.8 se indican los minerales identificados y descriptos por los referidos autores.

Los demás frentes descriptos y muestreados corresponden a tres canteras abandonadas (PE-2, PE-4 y PE-6) y a una con niveles variables de explotación (PE-3). El frente PE-2 presenta basaltos masivos con diferentes coloraciones cortados por un dique de diabasa. En este frente están expuestos niveles de roca sana, niveles de roca meteorizada (saproilito) y suelos colorados, estos dos últimos, constituyentes del destape con aproximadamente 3 m de espesor. PE-3 y PE-4 están constituidos por basaltos masivos rojizos y verdosos que se encuentran diaclasados de manera vertical con presencia de superficies curvilineales del tipo entablatura sigmoidal (Figura 2.10 c y d). Finalmente PE-6 presenta basaltos masivos en las paredes de la cantera y mínimas manifestaciones de basaltos vesículo – amigdalares en el piso de la misma.

Durante los trabajos de campo, además los frentes PE-1 a PE-6, se levantaron un total de 187 puntos, de los cuales 69 permitieron la observación y descripción de afloramientos (AF) de la FSG (Figura 2.11). De esta forma se relevaron rasgos que abarcan estructuras de zonación; patrones de disyunción tabular, columnar y en cuña; entablatura sigmoidal; marcas de bisel; niveles de coalescencia de vesículas (megavesículas), entre los más conspicuos. La Figura 2.12 muestra algunos ejemplos de las observaciones efectuadas.

CUADRO 2.8 Antecedentes de estudios mineralógicos y químicos efectuados en PE-5 (cantera Freyer, Eldorado, Misiones)

| FUENTE | LUGAR DE OCURRENCIA DE LOS RELLENOS | MINERALES IDENTIFICADOS EN LOS RELLENOS | | | | | | | | | | |
|--------|---|---|------------|-----------------------------------|-----------|-----------|------------|-------------|-----------|---------|----------|------|
| | | Cu Nativo | Celadonita | Variedades de SiO ₂ | Zeolitas | | | | Apofilita | Calcita | Baritina | Yeso |
| | | | | | Chabasita | Estilbita | Heulandita | Phillipsita | | | | |
| (1) | RELLENO DE MICRO-AMÍGDALAS | | X | | X | | | | | | | |
| | RELLENO DE AMÍGDALAS <i>Asociaciones identificadas</i> | | X | X | | | | | X | | | |
| | | | X | X | | | X | | X | | | |
| | | | X | X | X | | X | | | | | |
| | | | X | | | | X | | | X | | |
| | | | X | | | | | | X | X | | |
| | RELLENO DE DIACLASAS | X | | X | X | | | | | | | |
| | | | | X | | X | X | X | | | | |
| (2) | RELLENO DE MACRO-AMÍGDALAS | | X | X | X | | | | | | X | X |
| (3) | RELLENO DE AMÍGDALAS | | X | | X | | X | | | | | |

Referencias de las fuentes: (1) Latorre y Vattuone de Ponti (1985); (2) Latorre y Vattuone de Ponti (1986) y (3) Cortelezzi *et al.* (1987).

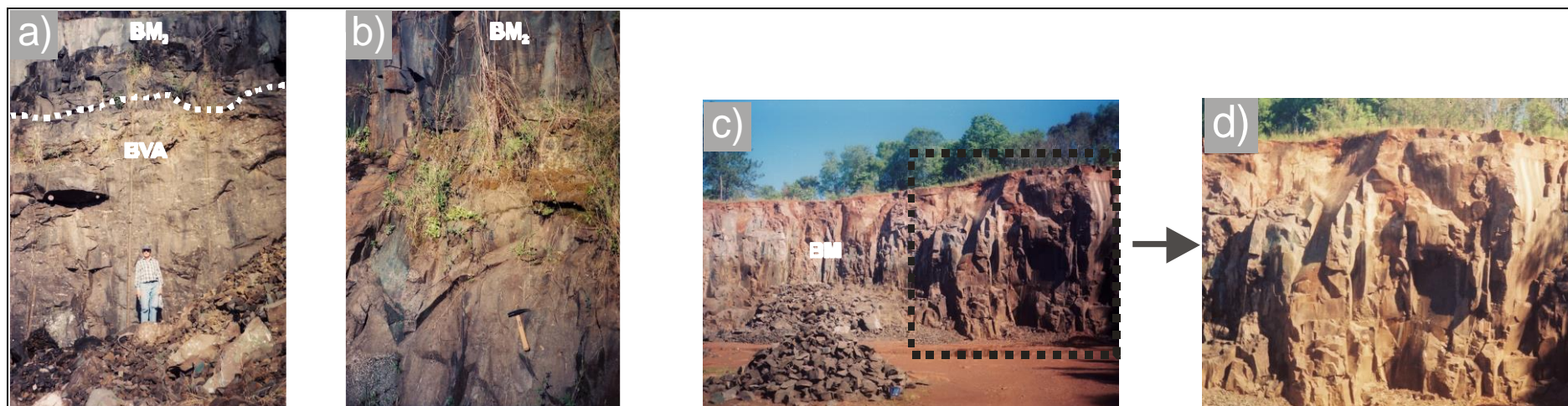


Figura 2.10: Perfiles PE-5 y PE-3. a) PE-5: Contacto entre los niveles BVA y BM₂. b) PE-5: Nivel BM₂ con coloraciones más bien verdosas, mayor densidad que BM₁ y estructura totalmente masiva. c) PE-3: basalto masivo con diferentes coloraciones (aproximadamente 12 m de altura). d) PE-3: detalle del frente indicado con líneas de puntos en (c) donde se observan diaclasas curvilineales del tipo entabladura sigmoidal.

Posición estratigráfica de los niveles muestreados

La cartografía geológica de C.A.R.T.A. 1962 – 1963 (1:50.000) consignó para la zona de estudio (hojas 2754-2-4 y 2754-8-1-2) cuatro *unidades estratigráficas*, denominadas de base a techo como basaltos $\beta 1$, $\beta 2$, $\beta 3$ y $\beta 4$. Al superponer los afloramientos registrados con los mencionados antecedentes, se observaron coincidencias parciales entre los contactos relevados y los límites de las unidades estratigráficas indicadas en la cartografía antecedente. La información obtenida de esta forma sugiere que las unidades involucradas en PE-1 corresponderían a $\beta 1$ y $\beta 2$, al igual que en los registros AF 03, 17, 32, 64, 65, 66, 67 y 69. Siguiendo el mismo criterio, los basaltos observados en los demás frentes corresponderían a $\beta 2$ (PE-2, PE-3 y PE-4), a $\beta 2$ y $\beta 3$ en PE-5 y a $\beta 3$ en PE-6. Con respecto a la unidad indicada como $\beta 4$, la misma no fue registrada durante el relevamiento. Se trata de una unidad cuyo desarrollo es bastante reducido en relación con las otras y que, en la zona de estudio, se encuentra únicamente representada en la hoja 2754-2-4 - Pto. Delicia (Figura 2.11).

Como ya fuera indicado, C.A.R.T.A. realizó la separación de los basaltos aflorantes en Misiones a partir de correlaciones geométricas, basadas principalmente en la morfología escalonada que presenta la FSG. Las once unidades estratigráficas determinadas de esta forma no representan coladas individuales, ya que cada una de ellas a su vez, puede incluir varias coladas (C.A.R.T.A. 1964, p. 52). Al respecto es oportuno indicar que el uso de este rasgo morfológico se encuentra también en trabajos recientes (por ej. Fernandes *et al.* 2010) en los cuales, aunque se subraya su gran utilidad para el mapeo de contactos entre derrames, siempre va acompañado de la profusa aplicación de otras herramientas para el establecimiento de las relaciones estratigráficas.

Si bien a los fines de la caracterización pretendida en este trabajo de tesis, los antecedentes de C.A.R.T.A. han resultado una base útil para las descripciones realizadas en la zona de Eldorado, se considera importante señalar que, a la luz de los conocimientos actuales sobre el emplazamiento de flujos basálticos continentales, es necesario considerar la aplicación de modelos más complejos para la descripción e interpretación de la morfología y estructuras presentes en los afloramientos basálticos de esta región.

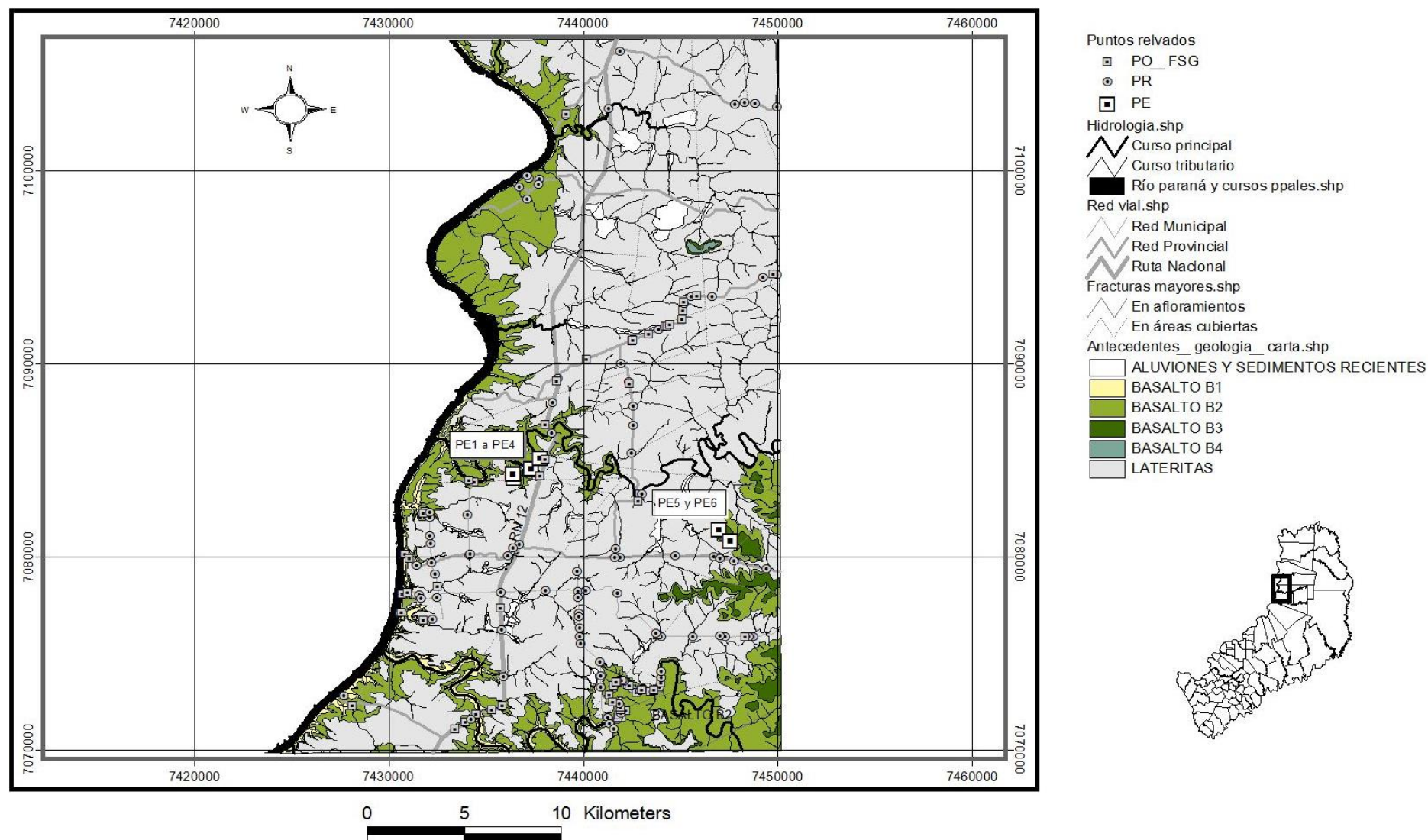


Figura 2.11: Ubicación de los puntos relevados durante el trabajo de campo. PE=Perfil expuesto en cantera; PO FSG= Puntos de afloramientos de la FSG; PR= Puntos de registro. La geología está basada en las Hojas 2754-2-4 y 2754-8-1-2 (C.A.R.T.A. 1962-1963).



Figura 2.12: Rasgos estructurales. a) Estructura zonada (RN 12; 7435745,10E; 7077333,48N). b) Estructura zonada con dos niveles vesiculares y uno masivo (RN 12; 7437779,24E; 7084196,67N). c) Disyunción tabular subyacente a un nivel vesicular (RN 12; 7438638,46E; 7089116,13N). d) Entabladura sigmoidal (RN 12; 7438029,35E; 7085063,00N). e) Patrón de disyunción en cuña, visto en planta (Salto Küppers; 7431760,23E; 7082261,68N). f) Marcas de bisel (Arroyo Piray Guazú; 7442156,09E; 7073484,91N). g) Marcas de bisel y entabladura sigmoidal (Club Náutico Eldorado; 7430706,63E; 7078088,22N). h) Cavidades (megavesículas) en basalto vesicular (RN12; 7437779E; 7084196,67N). i) Sectores de basalto vesicular atribuidos al ascenso de diapiros durante el proceso de inflación de la lava (Costanera Eldorado; 7431046,07E; 7079904,94N). Referencias: las líneas punteadas negras indican contactos, las flechas y círculos punteados blancos indican la ubicación de las estructuras.

Características petrográficas y mineralógicas de las muestras colectadas

Las variaciones estructurales reconocidas en los niveles muestreados permitieron diferenciar tres tipos de rocas: basaltos vesículo – amigdalares; basaltos masivos y brechas basálticas.

Las brechas basálticas son materiales heterogéneos formados a partir de depósitos interderrames que son englobados al sucederse una nueva colada. La muestra CELD 002 correspondiente al PE-1, es afanítica, presenta color gris violáceo, venillas de color pardo rojizo y escasas vesículas de 0,1 a 1 cm de longitud cuya forma pasa de redondeada a elíptica a medida que aumenta el tamaño. El interior de las vesículas está tapizado por una capa delgada de minerales de color verde.

Los basaltos vesiculares y amigdalares señalan la pérdida de gases ocurrida durante el enfriamiento de las coladas. Estos materiales pueden encontrarse en la base y tope de los derrames y también en sectores intermedios preservados como cilindros vesiculares y niveles horizontales, relacionados con procesos de segregación ocurridos en las etapas finales de cristalización de los flujos. Estos basaltos fueron muestreados en los perfiles PE-1 y PE-5 los cuales se interpretaron como niveles de tope. En el primer caso CELD 001 (PE-1), se trata de un basalto afanítico, de color gris rojizo con estructura vesículo-amigdalar. Las amígdalas rellenas con sílice dominan la muestra, tienen un tamaño promedio de 1 cm y formas alargadas elípticas que pasan a irregulares, mientras que las vesículas, son escasas (menos del 10% de la muestra) y tienen formas esferoidales que pasan a alargadas elípticas e irregulares. Las paredes de las vesículas están tapizadas por minerales de color verde que también se observan en el dominio masivo de la roca. En el caso de la muestra CELD 015 (PE-5), se trata de un basalto de color gris rojizo – verdoso, de grano fino, textura afanítica y estructura amigdalar dada por vesículas que presentan un tamaño que va desde 0,1 a 3 cm de largo y formas que pasan de esferoidales a elípticas e irregulares. La mayoría de las vesículas están rellenas con un mineral de color verde claro que en algunos casos conforma motas en la superficie de la roca; en otros, el mineral verde tapiza las paredes de vesículas que están ocupadas por calcita y una mineralización de color blanco en agregados arriñonados de grano muy fino.

Las variedades masivas presentan color gris predominante que muchas veces grada a tonalidades rojizas y verdosas. Las que corresponden a niveles expuestos a procesos de meteorización incipiente presentan, en forma superficial, color pardo y pardo amarillento. Son de grano fino que pasa de micro a macrocristalino en las muestras que corresponden a niveles centrales de las coladas.

Microscópicamente predomina la textura intergranular compuesta por tablillas de plagioclasa de composición básica (labradorita) entre las cuales se disponen piroxenos (augita) y minerales opacos. En algunas muestras se observó que la textura intergranular adquiere carácter subofítico cuando el piroxeno alcanza mayor tamaño y envuelve parcialmente a la plagioclasa. No se identificó vidrio en la descripción microscópica ni tampoco en los diagramas de DRX.

En todas las muestras se identificó magnetita, en la mayoría de los casos con illmenita y con cantidades variables de limonita y hematita. Esta última en muy poca cantidad en las muestras frescas. Se observó también la presencia de cobre nativo, posiblemente producto de procesos hidrotermales posteriores.

Se observó la presencia de minerales de color verde (distintas tonalidades) dispuestos intergranularmente en espacios con formas irregulares, muchas veces con aspecto fibroso o escamoso. Las vesículas de las muestras CELD 001 y CELD 015 contienen el mencionado material verde que fue identificado por DRX como una asociación de cuarzo, esmectita, celadonita, muy poca hematita y vestigios de plagioclasa.

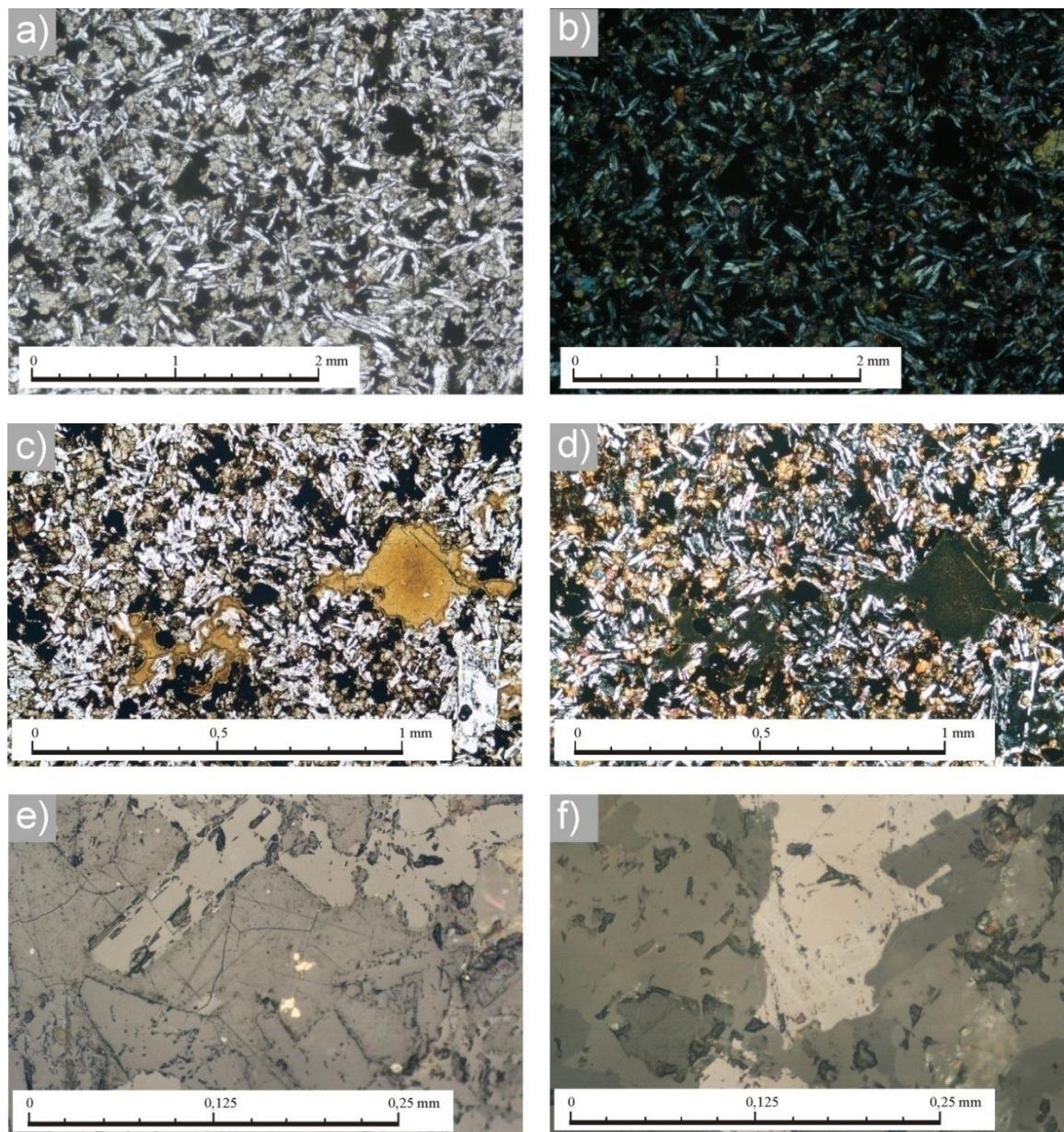


Figura 2.13: Fotomicrografías de cortes y pulidos. Fotomicrografías sin analizador (a) y con analizador (b) de la textura intergranular compuesta por tablillas de plagioclasa, entre las cuales se disponen piroxenos y minerales opacos. Muestra CELD 014. Fotomicrografías sin analizador (c) y con analizador (d) de un basalto amigdalal. Muestra CELD 015. e) Presencia de cobre nativo (centro de la imagen). Muestra CELD 006 (sin analizador). f) Reemplazo de hematita por magnetita según direcciones cristalográficas (centro de la imagen). Muestra CELD 005 (sin analizador).

Los estudios de DRX permitieron la identificación de plagioclasas y piroxenos como componentes mayoritarios y de óxidos de hierro, illmenita, olivina, cuarzo, argilominerales y ceolitas, como minerales accesorios.

La composición de las plagioclasa se determinó como labradorita corroborando lo observado en los cortes delgados. Los piroxenos son en general augita y algunas veces pigeonita (CELD 005; 014 y 016). Se identificó escasa olivina en la mayoría de las muestras. La mayor cantidad de hematita coincide con los niveles que presentan alteración incipiente (CELD 001; 002; 010; 011; 015 y 016) y la magnetita con los niveles más frescos (CELD 004; 005; 006 y escasa en 008). En los niveles de basalto vesículo-amigdalario y brecha es notoria la presencia de cuarzo (CELD 001 y 002) mientras que en otras (CELD 004; 010 Y 018) esta especie aparece como un componente minoritario.

Los argilominerales son minerales secundarios que están presentes en todos los casos y usualmente se encuentran distribuidos en distintos modos de ocurrencia (en vesículas o cavidades y en venas o microfracturas).

Sobre la base del estudio realizado por DRX, a los fines de caracterizar a las rocas como posible materia prima de uso cerámico, se estableció que entre los argilominerales predominan las esmectitas (normal 1,3-1,4 nm; glicolada 1,7-1,8 nm; calcinada 1,0 nm) y micas. No obstante la baja intensidad de las reflexiones correspondientes al d060 se estimó que las especies presentes son dioctaédricas. En algunos casos se observó en las reflexiones de las micas una asimetría y ensanchamiento que sugieren la presencia de una mezcla o interstratificación de minerales de las arcillas aunque en escasa proporción.

Para realizar la identificación de esmectita y eliminar la posibilidad de la existencia de otros minerales se efectuó la saturación con K y Mg. El desplazamiento de las líneas por el intercambio con Mg (Normal 1,5 nm; glicolada 1,71-1,75 nm) y la saturación con K (Normal 1,23-1,28 nm; calcinada 1,0 nm) muestran que el mineral tiene el comportamiento de una esmectita tetraédricamente sustituida (nontronita?).

En el trabajo previo de Gentili y Rimoldi (1979) se menciona la presencia de nontronita (en áreas de Brasil y Corrientes) que se forma por alteración de feldespatos cálcicos o desvitrificación de vidrio volcánico en presencia de aguas de lixiviación con Mg. En otros casos se suele encontrar la asociación celadonita-saponita-griffithita (basaltos de Misiones y Entre Ríos). La génesis de la asociación es producto de la desvitrificación de la mesostasis del basalto en presencia de soluciones ricas en ClNa. En la nontronita la capa tetraédrica se compone principalmente de Si y Al y posee una sustancial sustitución por Fe en la capa octaédrica a diferencia de las especies provenientes de depósitos comerciales con composiciones más cercanas a la de la montmorillonita-beidellita. Se menciona que la sustitución de Fe constituye más del 50 % de todos los cationes presentes en la capa octaédrica (Newman y Brown 1987). Estos valores sin embargo pueden ser erróneos debido a la dificultad de encontrar la esmectita pura ya que es usual que el mineral contenga algo de illita entre las capas.

En la mayoría de los casos las esmectitas están asociadas a una menor proporción de micas, la interferencia de la plagioclasa, presente aún en las fracciones finas, no permitió realizar una caracterización más detallada. En el espectro que presenta reflexiones más definidas se sugiere la presencia de celadonita. Dada la similitud que existe entre los espectros de DRX de celadonita y glauconita no es posible distinguirlas por esta técnica. Sin embargo, las especies ocurren en ambientes diferentes. La glauconita está asociada a ambientes marinos mientras que la celadonita ocupa venas y amígdalas de basaltos o productos de alteración en rocas volcánicas (Bailey 1980).

Características Geoquímicas

Se efectuaron dieciséis análisis químicos de elementos mayoritarios y traza cuyos resultados se muestran en el Cuadro 2.9. En este Cuadro están indicados también los perfiles de procedencia de las muestras y las unidades estratigráficas asignadas según los antecedentes de C.A.R.T.A. (1964).

De acuerdo al diagrama TAS ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) % vs. SiO_2 % (Le Bas *et al.* 1986), las rocas se clasifican como basaltos, con una sola muestra situada en el campo de las andesitas basálticas (Figura 2.14). El diagrama AFM de Irvine y Baragar (1971) (Figura 2.15), utilizado para discriminar los campos calcoalcalinos y tholeíticos, muestra la composición tholeítica de las muestras estudiadas, la cual se confirma en el diagrama FeO_T/MgO vs. SiO_2 de Miyashiro (1974) (Figura 2.16).

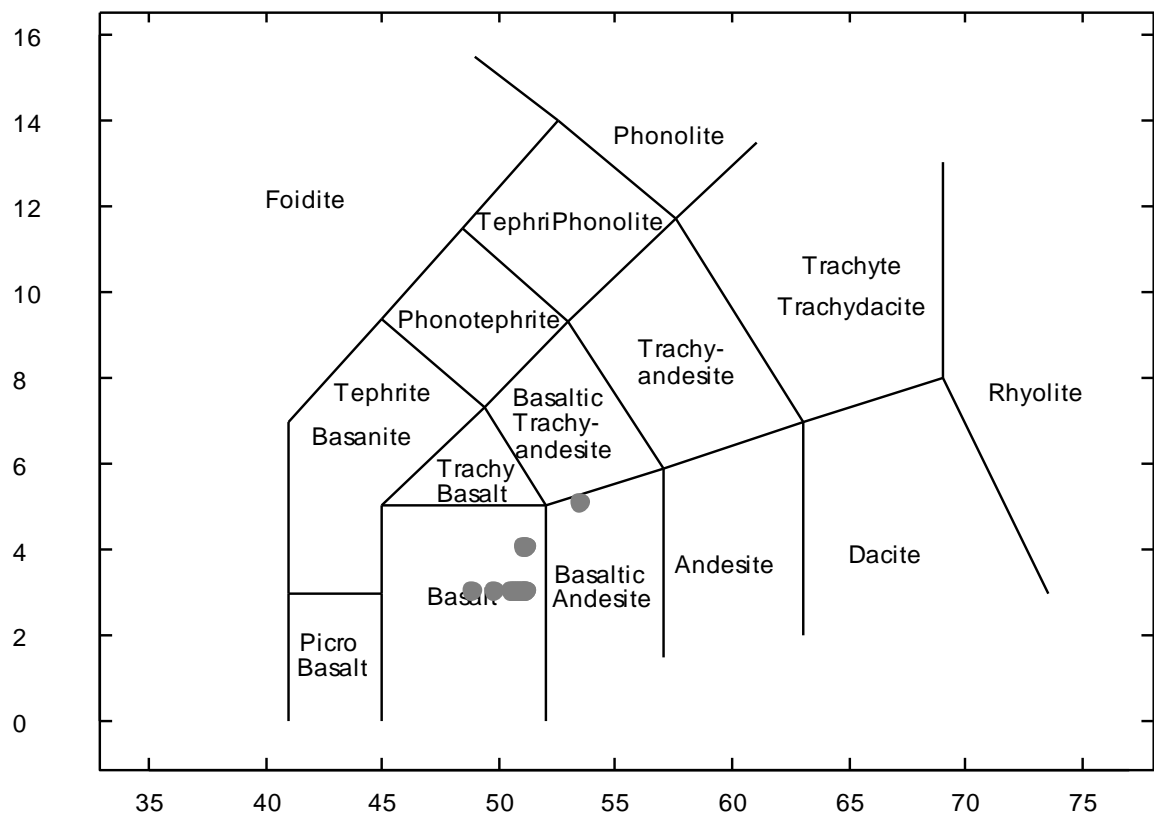


Figura 2.14: Clasificación de las rocas ígneas de la zona de Eldorado de acuerdo al diagrama TAS (Le Bas *et al.* 1986).

| Muestra | CELD 001 | CELD 002 | CELD 003 | CELD 004 | CELD 005 | CELD 009 | CELD 010 | CELD 011 | CELD 006 | CELD 007 | CELD 008 | CELD 016 | CELD 015 | CELD 014 | CELD 017 | CELD 018 |
|--------------------------------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Perfil de muestreo | PE-1 | | | | | PE-2 | | | PE-3 | | PE-4 | PE-5 | | | PE-6 | |
| Unid. CARTA (1964) | $\beta 1$ | Brecha | $\beta 2$ | $\beta 2$ | $\beta 2$ | $\beta 2$ | $\beta 2$ | Dique | $\beta 2$ | $\beta 2$ | $\beta 2$ | $\beta 2$ | $\beta 2$ | $\beta 3$ | $\beta 3$ | $\beta 3$ |
| Tipo | H-Ti/Y | H-Ti/Y | H-Ti/Y | H-Ti/Y | H-Ti/Y | H-Ti/Y | H-Ti/Y | H-Ti/Y | H-Ti/Y | H-Ti/Y | H-Ti/Y | H-Ti/Y | H-Ti/Y | H-Ti/Y | L-Ti/Y | H-Ti/Y |
| SiO ₂ | 63,99 | 66,60 | 48,98 | 51,05 | 50,65 | 51,26 | 50,78 | 53,59 | 50,97 | 51,23 | 51,15 | 51,26 | 51,15 | 51,26 | 50,83 | 49,90 |
| TiO ₂ | 1,83 | 1,65 | 2,37 | 2,31 | 2,60 | 2,03 | 2,04 | 3,47 | 2,34 | 1,89 | 2,11 | 1,88 | 2,06 | 1,58 | 1,67 | 1,69 |
| Al ₂ O ₃ | 10,65 | 9,99 | 15,33 | 15,24 | 14,68 | 15,53 | 15,56 | 11,98 | 15,27 | 15,31 | 15,47 | 14,48 | 13,75 | 16,09 | 15,64 | 19,71 |
| FeO | 10,20 | 9,77 | 13,91 | 13,19 | 13,62 | 12,59 | 12,64 | 15,15 | 13,14 | 12,68 | 12,60 | 13,15 | 13,14 | 12,28 | 12,45 | 12,28 |
| MnO | 0,12 | 0,14 | 0,18 | 0,19 | 0,19 | 0,17 | 0,18 | 0,19 | 0,19 | 0,16 | 0,18 | 0,19 | 0,19 | 0,18 | 0,17 | 0,18 |
| MgO | 2,66 | 2,30 | 5,80 | 4,26 | 4,29 | 3,80 | 5,40 | 3,89 | 4,25 | 4,90 | 4,72 | 4,76 | 6,19 | 4,66 | 5,22 | 4,26 |
| CaO | 6,18 | 5,43 | 9,11 | 9,55 | 9,73 | 9,35 | 9,05 | 5,58 | 9,64 | 9,65 | 9,30 | 10,60 | 9,89 | 9,44 | 9,74 | 8,07 |
| Na ₂ O | 2,11 | 1,92 | 2,48 | 2,56 | 2,57 | 2,71 | 2,53 | 2,70 | 2,57 | 2,58 | 2,62 | 2,35 | 2,34 | 2,76 | 2,89 | 2,38 |
| k ₂ O | 2,06 | 2,06 | 1,43 | 1,21 | 1,25 | 2,12 | 1,39 | 2,82 | 1,19 | 1,20 | 1,43 | 0,97 | 0,94 | 1,48 | 1,09 | 1,18 |
| P ₂ O ₅ | 0,20 | 0,14 | 0,41 | 0,44 | 0,42 | 0,44 | 0,43 | 0,63 | 0,44 | 0,40 | 0,42 | 0,36 | 0,35 | 0,27 | 0,30 | 0,35 |
| suma | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| Cr | 187 | 179 | 113 | 109 | 125 | 103 | 122 | 48 | 113 | 119 | 110 | 111 | 109 | 129 | 131 | 136 |
| Ni | 39 | 42 | 62 | 57 | 56 | 52 | 54 | 15 | 49 | 54 | 50 | 49 | 53 | 62 | 60 | 55 |
| La | 13 | 16 | 21 | 19 | 19 | 20 | 23 | 35 | 24 | 19 | 21 | 21 | 21 | 23 | 19 | 20 |
| Ce | 87 | 70 | 58 | 54 | 47 | 54 | 52 | 66 | 52 | 50 | 54 | 50 | 53 | 48 | 40 | 35 |
| Nd | 43 | 31 | 31 | 32 | 27 | 29 | 28 | 42 | 30 | 32 | 29 | 26 | 27 | 25 | 22 | 23 |
| Ba | 350 | 412 | 402 | 379 | 353 | 378 | 399 | 576 | 354 | 359 | 356 | 356 | 385 | 329 | 317 | 485 |
| Rb | 36 | 60 | 35 | 30 | 30 | 50 | 31 | 84 | 28 | 27 | 33 | 19 | 31 | 39 | 29 | 30 |
| Sr | 248 | 251 | 382 | 375 | 397 | 383 | 358 | 333 | 391 | 390 | 369 | 344 | 452 | 312 | 303 | 250 |
| Zr | 187 | 206 | 172 | 178 | 178 | 165 | 165 | 266 | 173 | 169 | 171 | 170 | 173 | 145 | 159 | 138 |
| Nb | 16 | 19 | 19 | 19 | 18 | 18 | 18 | 47 | 18 | 15 | 17 | 19 | 16 | 11 | 15 | 13 |
| Y | 23 | 24 | 34 | 34 | 34 | 33 | 35 | 49 | 32 | 33 | 30 | 35 | 33 | 27 | 33 | 32 |
| Ti/Y | 477 | 412 | 418 | 407 | 458 | 369 | 349 | 425 | 438 | 343 | 422 | 322 | 374 | 351 | 303 | 317 |
| Ti/Zr | 59 | 48 | 83 | 78 | 88 | 74 | 74 | 78 | 81 | 67 | 74 | 66 | 71 | 65 | 63 | 73 |
| Zr/Y | 8,1 | 8,6 | 5,1 | 5,2 | 5,2 | 5,0 | 4,7 | 5,4 | 5,4 | 5,1 | 5,7 | 4,9 | 5,2 | 5,4 | 4,8 | 4,3 |
| Nb/La | 1,2 | 1,2 | 0,9 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 1,3 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,8 | 0,5 | 0,8 | 0,7 |

CUADRO 2.9: Elementos mayoritarios (%) y traza (ppm) de las rocas volcánicas de la zona de estudio. PE= perfil expuesto en cantera; H-Ti/Y > 310; L-Ti/Y < 310 según Peate (1997).

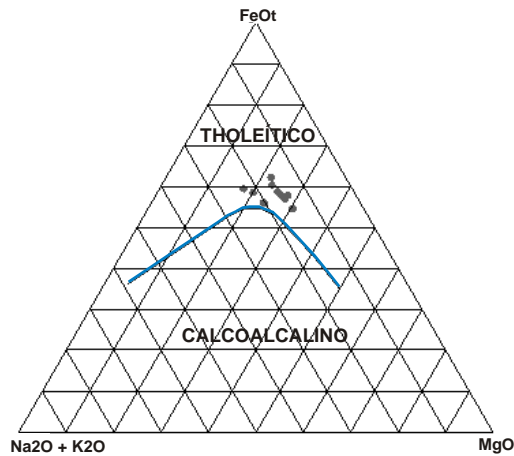


Figura 2.15: Diagrama de discriminación AFM, según Irvine y Baragar (1971).

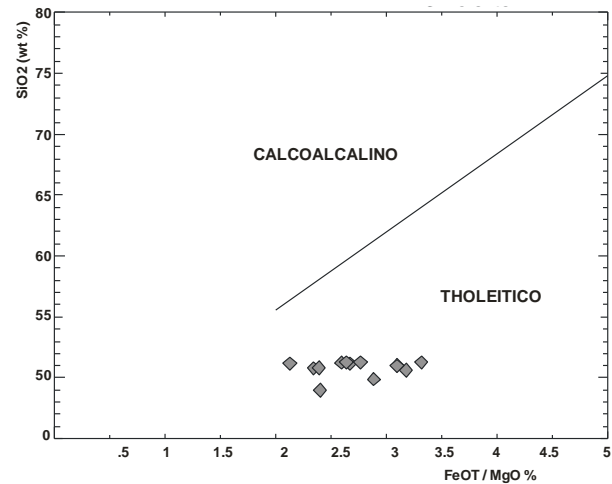


Figura 2.16: Diagrama de discriminación según Miyashiro (1974).

Las muestras analizadas presentan valores de $Ti/Y > 310$, salvo una (CELD 017) que se encuentra levemente por debajo de este límite (Figura 2.17). De acuerdo a los criterios definidos por Peate *et al.* (1992) y Peate (1997), corresponden al grupo de alto Ti/Y conformado por los magmas tipo Urubici, Pitanga, Paranapanema y Ribeira. Estos magmas comparten características composicionales que los separan de los tipos Gramado y Esmeralda (bajo Ti/Y) que no fueron hallados dentro del muestreo realizado.

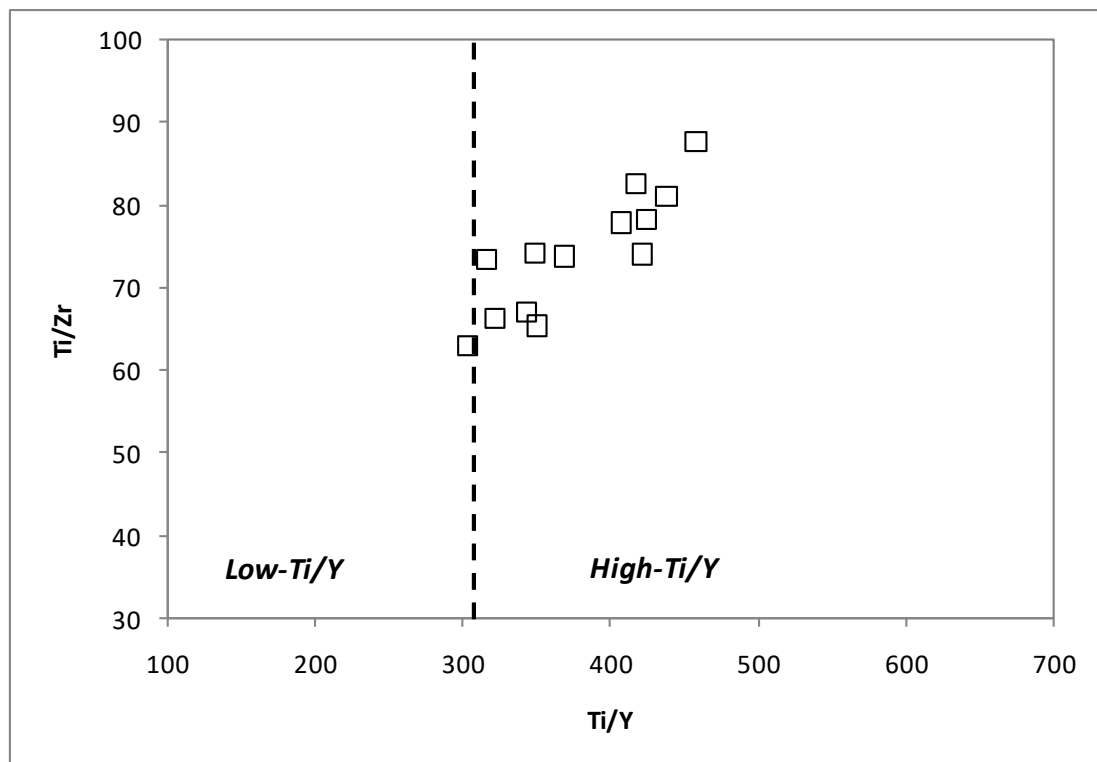


Figura 2.17: Diagrama Ti/Y vs. Ti/Zr según Peate (1997). La línea punteada indica la división entre los magmas tipo de bajo Ti/Y : Gramado y Esmeralda y los magmas tipo de alto Ti/Y : Urubici, Pitanga, Paranapanema y Ribeira (>310).

De acuerdo a la clasificación de Peate *et al.* (1992), el rango de contenidos TiO_2 de los magmas de alto Ti/Y abarca valores desde 1,5 a mayores de 3,3%. Las relaciones de Ti/Y ,

Ti/Zr y Zr/Y también varían: para Ti/Y >310 (Ribeira); >330 (Paranapanema); >350 (Pitanga) y >500 (Urubici); para Ti/Zr >65 (Ribeira y Paranapanema); >60 (Pitanga) y >57 (Urubici) y, para Zr/Y entre 3,5 – 7,0 (Ribeira); 4,0 – 7,0 (Paranapanema); >5,5 (Pitanga) y >6,5 (Urubici). De igual manera, las diferencias en el contenido de Sr son importantes en esta clasificación ya que permiten hacer distinciones dentro del grupo. Tal es el caso del magma Urubici el cual es distinguido de los demás litotipos (junto con otros criterios) por su alto contenido de Sr (> 550 ppm), y el caso de Paranapanema que puede ser separado de Pitanga por sus contenidos relativamente bajos en Zr/Y (< 6,0) y Sr (<450 ppm) (Peate *et al.* 1992). Con respecto a la distinción entre Ribeira y Paranapanema la misma es considerada una de las más difíciles de la clasificación (Peate *et al.* 1992).

Según este esquema y en función de los datos geoquímicos disponibles para este trabajo, se intentó avanzar en la definición de los litotipos de la clasificación considerando adicionalmente la posición estratigráfica inferida a partir de los antecedentes cartográficos y del trabajo de campo realizado. A tal fin las muestras fueron relacionadas según estos criterios y sus valores comparados con los parámetros de Peate *et al.* (1992) (Cuadro 2.10).

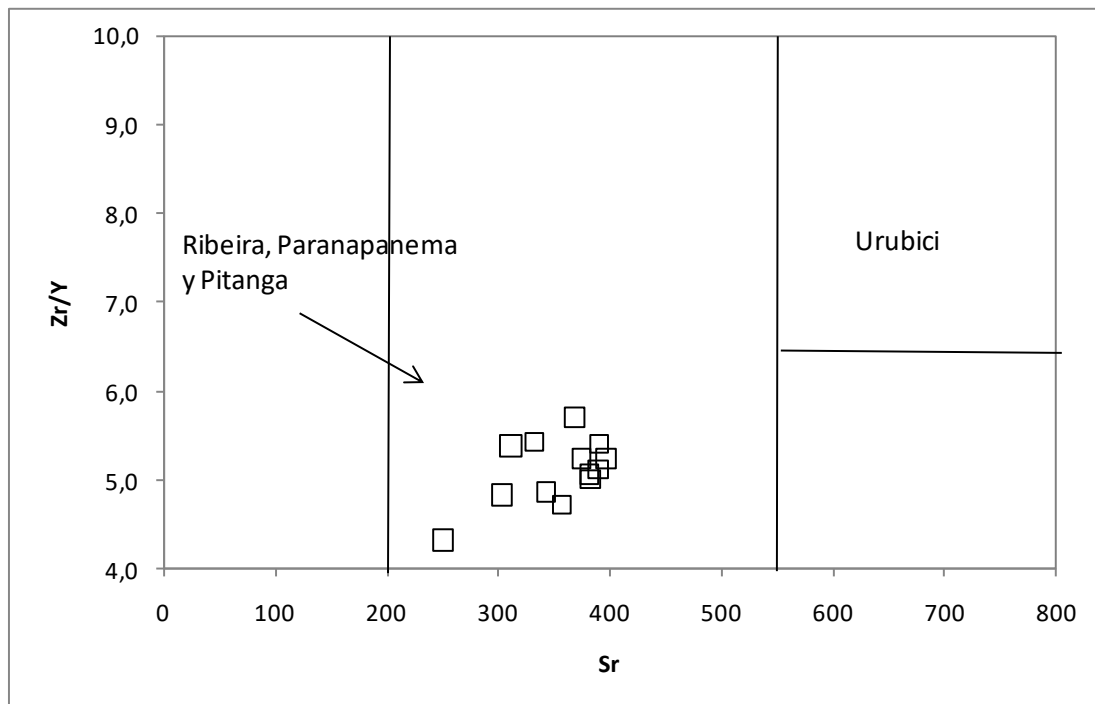


Figura 2.18: Diagrama Sr vs. Zr/Y según los criterios de Peate *et al.* (1992). Los campos que se muestran corresponden al grupo de magmas de alto Ti/Y. Los magmas bajo Ti/Y (Gramado y Esmeralda) fueron omitidos debido a que estos no fueron hallados en el muestreo realizado.

La clasificación final realizada de esta forma asigna a las muestras reconocidas como $\beta 2$ a la variedad Paranapanema por sus contenidos relativamente más bajos de TiO_2 , de $\text{Zr/Y} < 6$ y de $\text{Sr} < 450$. Las muestras asignadas a $\beta 3$ se consideran compatibles con el tipo Ribeira debido a sus bajos contenidos de $\text{TiO}_2 < 1,7$ y de Ti/Y. Finalmente el dique muestreado en PE-2 fue clasificado también como Paranapanema. Si bien esta muestra presenta un contenido relativamente alto de TiO_2 (3,47), el cual excede el límite establecido (1,7 a 3,2), sus valores de $\text{Zr/Y} < 6$ y de $\text{Sr} < 450$ dificultan su clasificación dentro de la variedad

Pitanga. En la figura 2.19 se muestra cómo quedan discriminadas las muestras de Eldorado según los campos definidos por Peate *et al.* (1992) para los contenidos de TiO₂ y Sr.

| Unid. estratigráficas (β) (según CARTA 1964) | β2 (PE-1, PE-2, PE-3, PE-4 y PE-5) | | β3 (PE-5 y PE-6) | | Dique (PE-2) | |
|---|------------------------------------|---------------|------------------|---------------|---------------------|---------------|
| Parámetro | Valores | Clasificación | Valores | Clasificación | Valores | Clasificación |
| SiO ₂ | 48,98 - 51,26 | Pa - Pi | 49,90 - 51,26 | Ri - Pa | 53,90 | Pi |
| TiO ₂ | 1,88 - 2,60 | Pa | 1,58 - 1,69 | Ri | 3,47 | Pi |
| P ₂ O ₅ | 0,36 - 0,44 | Pa - Pi | 0,27 - 0,35 | Ri - Pa | 0,63 | Pa - Pi |
| Sr | 344 - 397 | Pa | 250 - 312 | Ri - Pa | 333 | Pa |
| Ba | 353 - 402 | Pa - Pi | 329 - 485 | Ri - Pa | 576 | Pa - Pi |
| Zr | 165 - 178 | Pa | 138 - 159 | Ri - Pa | 266 | Pi |
| Ti/Zr | 66 - 88 | Pa - Pi | 63 - 73 | Ri - Pa | 78 | Pa - Pi |
| Ti/Y | 322 - 458 | Ri - Pa | 303 - 351 | Ri | 425 | Pa - Pi |
| Zr/Y | 4,7 - 5,7 | Pa - Pi | 4,3 - 5,4 | Ri - Pa | 5,4 | Pa |
| Sr/Y | 10 - 12 | Pa - Pi | 8 - 12 | Ri - Pa | 7 | Pa |
| Ba/Y | 10 - 12 | Pa - Pi | 10 - 15 | Ri - Pa | 12 | Pa - Pi |
| Clasificación Final | Paranapanema | | Ribeira | | Paranapanema | |

CUADRO 2.10: Clasificación de los basaltos del área de estudio basada en Peate *et al.* (1992). Pi= Pitanga; Pa= Paranapanema y Ri= Ribeira.

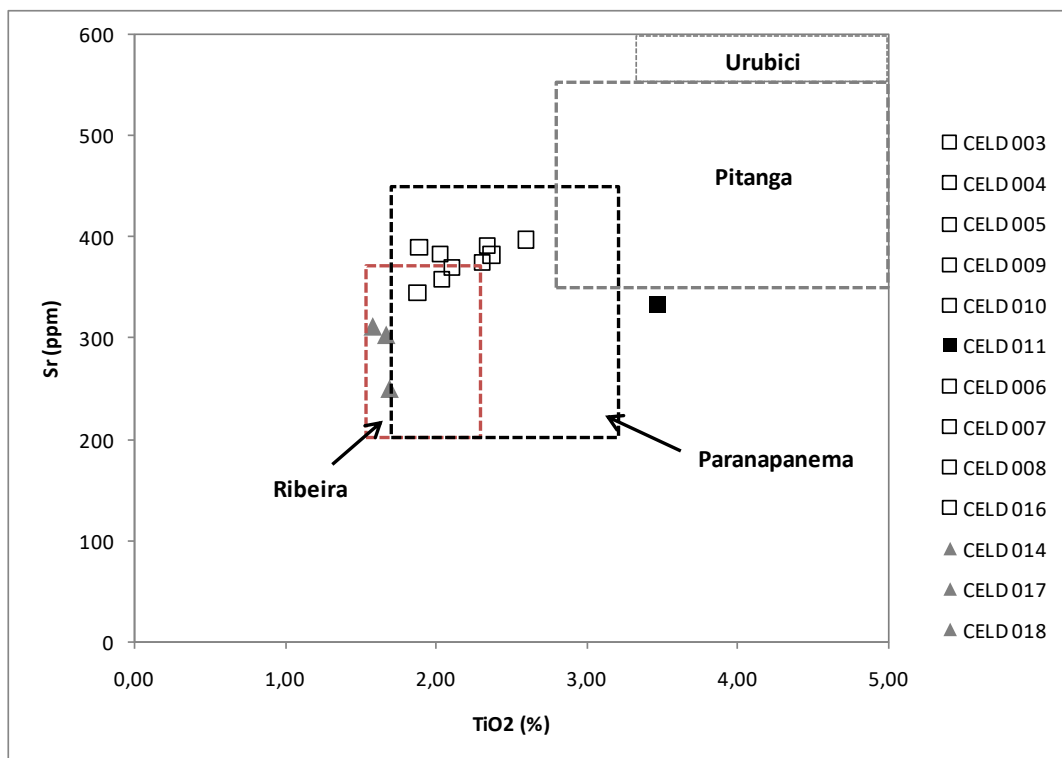


Figura 2.19: Diagrama TiO₂ vs. Sr de discriminación de magmas tipo de acuerdo a los criterios definidos por Peate *et al.* (1992). Los campos de bajo Ti/Y (Gramado y Esmeralda) no están incluidos en la figura debido a que estos litotipos no fueron hallados en el muestreo realizado. Cuadrados vacíos: muestras reconocidas como β2; cuadrado lleno: dique muestreado en PE-2 y triángulos llenos: muestras asignadas a β3.

Los resultados obtenidos para la zona de estudio concuerdan con los publicados en los trabajos previos de Peate *et al.* (1992); Lagorio y Leal (2005a); Mena *et al.* (2006) y Lagorio y Vizán (2011). Peate *et al.* (1992) reproducen mapas esquemáticos (Figura 13: 132 y Figura 14: 133) que muestran la distribución en el territorio de Misiones de las

variedades Pitanga, Paranapanema (predominante), Ribeira y Esmeralda, según un trayecto norte-sur que coincide parcialmente con la Ruta Nacional N° 12 (Figura 2.4). Por otra parte, los muestreos realizados por Lagorio y Leal (2005), en el sur de Misiones (Posadas y San Ignacio) y en la Ruta Provincial N° 17, entre las localidades de Eldorado y Bernardo de Irigoyen (dirección este – oeste), dan cuenta de la existencia de los tipos Gramado y Pitanga en el sur de la provincia (San Ignacio) y de la predominancia de los tipos Paranapanema y Ribeira en la transecta Eldorado – Bernardo de Irigoyen. Estos resultados coinciden con los estudios realizados por Mena *et al.* (2006), en muestras procedentes de la misma transecta. Finalmente, el reciente trabajo de Lagorio y Vizán (2011), suma a las variedades identificadas previamente en Misiones el reconocimiento del tipo Urubici en el área de San Ignacio. La tipificación de estos autores confirma además la predominancia de los litotipos Paranapanema y Ribeira en el norte de la provincia (transecta Eldorado – Bernardo de Irigoyen) y el registro de los magmas Paranapanema, Gramado y Pitanga en el sur del territorio.

Lo expuesto hasta aquí pone de manifiesto las variaciones geoquímicas que puede presentar la FSG en Misiones, donde se presume que se daría la coexistencia de todos los litotipos distinguidos para la Provincia Ígnea de Paraná. Aumentar el conocimiento geoquímico actual de estas rocas -para precisar la distribución de los distintos tipos de magmas- y avanzar en definiciones geocronológicas y estratigráficas, es un interesante campo de trabajo, indispensable para caracterizar al magmatismo de Serra Geral en el NE de Argentina, y efectuar comparaciones y/o correlaciones regionales con los países limítrofes.

CAPÍTULO 3

Usos de las rocas basálticas

Aptitudes cerámicas y ornamentales

CAPÍTULO 3

Usos de las rocas basálticas. Aptitudes cerámicas y ornamentales

Introducción

Los basaltos de la Formación Serra Geral (FSG) son muy utilizados en la construcción, especialmente para la producción de agregados pétreos. Estas rocas se explotan en la Mesopotamia argentina, así como también en los países limítrofes que forman parte de la Provincia Ígnea Paraná. En Argentina los yacimientos más importantes (en extensión areal y volumen) se encuentran en Misiones, donde su aprovechamiento constituye la principal actividad minera a nivel provincial.

Si bien la utilización actual de estas rocas es importante y sus aptitudes para las aplicaciones antes mencionadas son bien conocidas y objeto de permanentes trabajos e investigaciones, existen otros usos potenciales que están menos difundidos en el país y que hasta ahora han sido poco estudiados. Dichos usos abarcan aplicaciones industriales, ornamentales y enmiendas minerales. Cada una de ellas plantea diferentes requisitos que deben ser evaluados desde el punto de vista aplicado utilizando variables tales como la composición química y mineralógica, textura y estructura de la roca, así como también diversas propiedades físicas y mecánicas determinadas a través de ensayos normalizados.

Dentro de las aplicaciones industriales el basalto puede ser utilizado en cerámica, ya sea como componente de una masa cerámica, como constituyente de un esmalte o como material vitro-cerámico (Hevia 2006). Trabajos previos realizados con basaltos como componentes principales (Tcheichvili y Hevia 1982, Hevia y Bustos 1991), examinaron las aptitudes de estas rocas para la fabricación de cerámica de la construcción (revestimientos de pisos y paredes, externos e internos) y para la elaboración de cerámica fina para vajilla. En ellos se señalan resultados satisfactorios para los productos obtenidos, destacándose la verificación de características tales como temperaturas de sinterización relativamente bajas, dureza satisfactoria, buena resistencia mecánica, y la obtención, en el caso de los esmaltes, de colores en la gama del marrón con diferentes texturas. Estos estudios consideran al basalto como un material no convencional en cerámica con potenciales posibilidades de sustituir a materias primas menos abundantes y más costosas (algunos óxidos, pigmentos y fundentes).

En este trabajo se plantea la utilización de basaltos de la FSG en la fabricación de cerámica roja, como componente no plástico o material de relleno “filler”, utilizando para ello mezclas con materiales arcillosos locales. Se plantea también el aprovechamiento de residuos basálticos finos generados a partir de una planta de trituración, por considerar que su utilización podría redundar en beneficios tanto económicos como ambientales debido a que en muchos casos se trata de un material no utilizado y disponible a bajo costo.

Se suman a estas alternativas la consideración de algunos potenciales usos ornamentales (Ciccioli y Schalamuk 2009). Para comenzar a indagar sobre ellos, se incluyó una caracterización tecnológica básica de basaltos procedentes del área de estudio y de la zona centro de la provincia.

Este capítulo contiene primero, una revisión de las características de las rocas basálticas en general y de sus principales usos conocidos, con énfasis en las propiedades importantes que deben investigarse para cada aplicación en particular, de acuerdo a lo establecido en normas, manuales y publicaciones consultadas para tal fin. Seguidamente, se desarrollan los estudios efectuados con el propósito de conocer las aptitudes cerámicas y ornamentales de algunos basaltos de la FSG. Los materiales y métodos empleados y los resultados obtenidos se presentan por separado a fines de facilitar la exposición del trabajo realizado.

Definición, clasificación y características generales de las rocas basálticas

Los basaltos son rocas volcánicas básicas constituidas esencialmente por plagioclasas cálcicas y piroxenos. Pueden contener olivinas y presentar de manera minoritaria feldespatoides o cuarzo intersticial (Le Maitre 2002). Son rocas de color oscuro, normalmente gris o negro, que cuando se alteran pueden presentar coloraciones rojizas, verdosas o pardas.

El contenido mineral o moda es el primer criterio recomendado para clasificar a las rocas volcánicas en general. Para ello se utiliza el diagrama QAPF (Streckeisen 1978), en el cual los basaltos comparten con las andesitas los campos 9 y 10 (Figura 3.1), diferenciándose entre sí por medio del índice de color y por el contenido de SiO_2 . Sin embargo, debido al pequeño tamaño de los cristales y/o a la presencia de vidrio volcánico, la determinación modal en estas rocas es difícil de realizar, por lo que su definición primaria se efectúa a través de clasificaciones químicas, como por ejemplo, el diagrama TAS (Álcalis Totales vs. Sílice, según Le Bas *et al.* 1986). En este diagrama a los basaltos les corresponde el campo B cuyos límites están acotados entre el 45 y 52% de SiO_2 (rocas básicas) y hasta el 5% de álcalis totales ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) (Figura 3.2). Dentro de esta composición existen diferentes tipos, cuya clasificación y nomenclatura se apoya en criterios químicos y mineralógicos. Varias líneas y curvas teóricas han sido propuestas para separar -sobre el diagrama TAS- basaltos alcalinos de subalcalinos (Le Maitre 2002). Estas series también se diferencian utilizando los diagramas de variación de Harker que comparan contenidos de sílice con respecto a los demás óxidos (Rollinson 1993). Los diagramas triangulares AFM (Kuno 1968, Irvine y Baragar 1971) permiten distinguir -dentro de los basaltos subalcalinos- variedades calcoalcalinas (de alta alúmina) y tholeíticas. Otras clasificaciones emplean cálculos normativos (norma CIPW) -realizados a partir de análisis químicos con los que se obtienen composiciones minerales que no necesariamente están en la roca- como por ejemplo, el tetraedro de Yoder y Tilley (1962) que representa el estado de saturación de sílice a través de dos planos que separan basaltos tholeíticos cuarzosos de tholeíticos olivínicos y alcalinos. Según los principios de esta clasificación la existencia de nefelina normativa indica que el basalto es alcalino y no subalcalino (Le Maitre 2002). Basado en

este esquema Thompson (1984) elaboró una clasificación normativa que utiliza proporciones de nefelina y otros feldespatoides, y olivina, diópsido, hipersteno y cuarzo, para diferenciar basaltos subsaturados de sílice (alcalinos) con olivina y nefelina normativa; saturados (basaltos tholeínicos olivínicos) con hipersteno y olivina y; sobresaturados (basaltos tholeínicos cuarzosos) con diópsido, hipersteno y cuarzo normativos (Rollinson 1993).

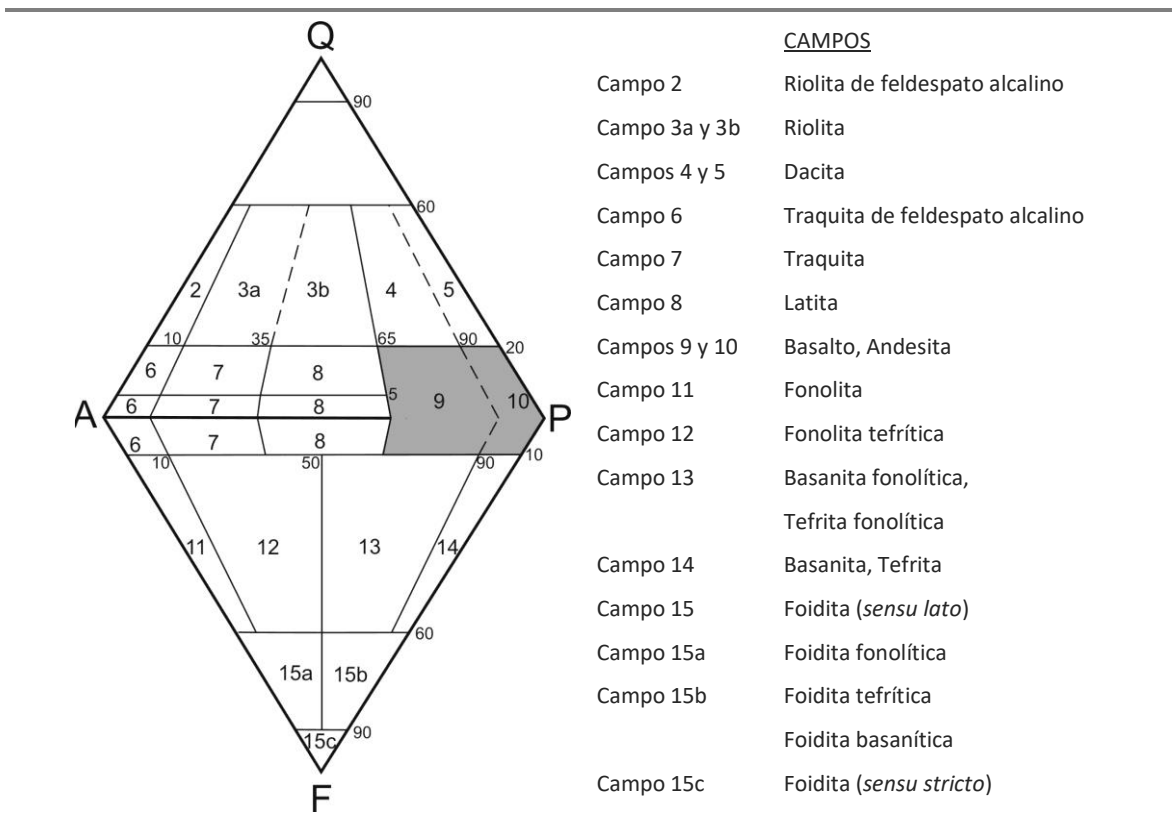


Figura 3.1: Diagrama de clasificación modal QAPF de rocas volcánicas (basado en Streckeisen 1978). En color gris se indican los campos 9 y 10 que corresponden a basaltos y andesitas. Q= cuarzo, A= feldespato alcalino, P= plagioclasa, F= feldespatoides. Modificado de Le Maitre (2002): 31.

Dentro de estas variaciones composicionales, los minerales primarios (esenciales y accesorios), que pueden conformar las distintas asociaciones, son –según el tipo de basalto- plagioclasas, piroxenos, olivinas, óxidos de hierro y titanio, apatita, sanidina, grupo de la sílice, feldespatoides y vidrio volcánico. La composición típica de las plagioclasas es labradorita y aparece como fenocristales y en la pasta. También se pueden hallar composiciones más ácidas en la matriz y en posiciones intersticiales (por ejemplo andesina, oligoclasa y hasta albita). Los piroxenos pueden ser clinopiroxenos y ortopiroxenos. De los primeros son importantes la augita (enriquecida en calcio) y la pigeonita (empobrecida en calcio) y dentro de los segundos, es común –en algunas variedades- el hipersteno. La augita se da como fenocristal y en la pasta, la pigeonita en la matriz y el hipersteno formando fenocristales. Las olivinas y feldespatoides pueden constituir, según el basalto, fenocristales o pasta. También se pueden hallar en la matriz y/o en posiciones intersticiales, óxidos de hierro y titanio, apatita, vidrio volcánico, cuarzo, tridimita, cristobalita y otros.

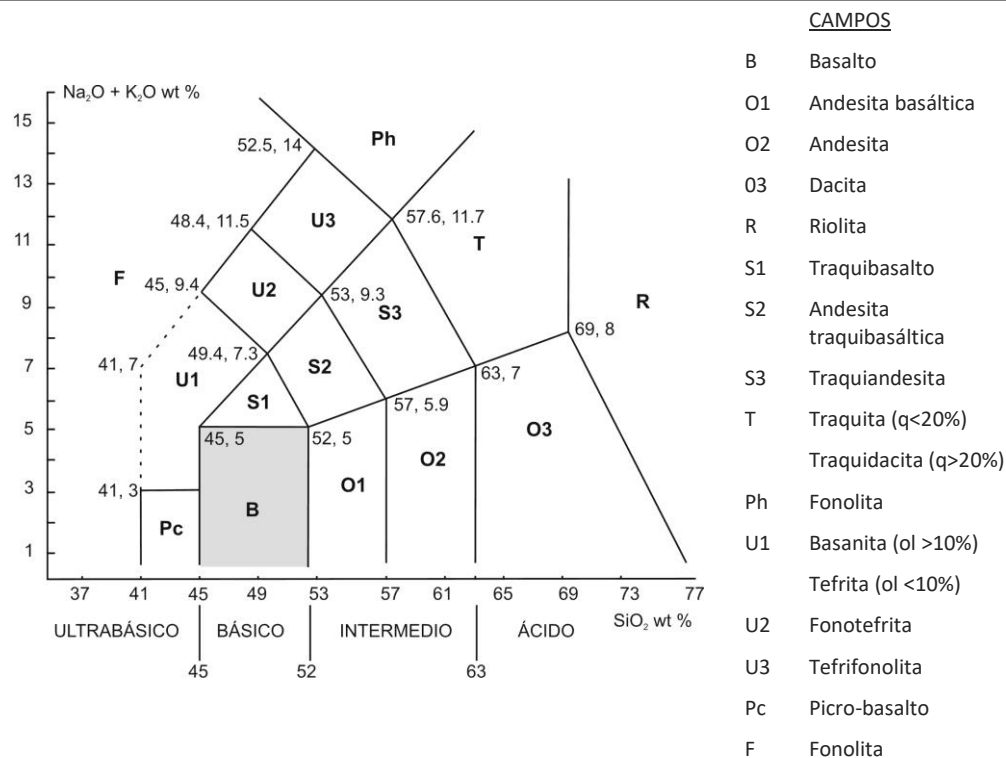


Figura 3.2: Diagrama TAS (álcalis totales vs. sílice) utilizado para la clasificación química de rocas volcánicas, basado en Le Bas *et al.* (1986). Con color gris se indica el campo B (basaltos). Abreviaturas: ol= olivina normativa; q= cuarzo normativo. Modificado de Le Maitre (2002): 35 y 36.

Cuando los componentes primarios se ven sometidos a procesos de alteración, endógenos o exógenos, tiene lugar la formación de minerales secundarios. Estos pueden ser el resultado de la transformación de minerales pre-existentes o de la precipitación de nuevos minerales en vesículas y en discontinuidades entre derrames, juntas o diaclasas. Son importantes para los basaltos los filosilicatos, carbonatos, el grupo de las zeolitas, el grupo de la sílice, los óxidos e hidróxidos de hierro, los hidróxidos de aluminio, entre otros. La composición, abundancia y distribución de estos productos pueden ser decisivas para ciertas aplicaciones. Así por ejemplo, la formación de concentraciones locales de analcima a expensas de la meteorización de la nefelina presente en algunos basaltos alcalinos, provoca cambios de volumen en la roca -que bajan su resistencia- condicionando su uso como árido (Lorenz y Gwosdz 2004 y Bustillo Revuelta *et al.* 2014). Procesos como la palagonitización del vidrio volcánico que deriva en la formación de esmectita (González 2008) o la presencia de ciertas formas de la sílice que resultan indeseables por las reacciones álcali - agregado que provocan en los hormigones (Bustillo Revuelta *et al.* 2014), son solo algunos ejemplos de cómo la mineralogía secundaria puede ser un factor condicionante para el aprovechamiento satisfactorio de estas rocas.

Desde el punto de vista petrográfico, los basaltos tienen por lo general texturas afaníticas, es decir son de grano fino con componentes que miden menos de un milímetro, lo cual impide reconocimientos mineralógicos a simple vista. De acuerdo al grado de cristalinidad existen variedades holocristalinas, hipocristalinas y vítreas. Los componentes cristalinos pueden tener un tamaño similar (equigranulares) o diferente (inequigranulares). En el primer caso, es muy común la textura intergranular compuesta por tablillas de plagioclasas

entre las cuales se disponen granos de piroxeno, minerales opacos, olivinas, y otros. En el segundo caso, son características las texturas hiales en sus dos variedades: cristales más grandes inmersos en una masa de cristales menores; y cristales más pequeños englobados en cristales mayores (Teruggi y Legizamón 1986). Las texturas porfírica y microporfírica son ejemplos de las primeras; mientras que para las segundas se pueden mencionar a las texturas glomeroporfírica y subofítica. Si la roca contiene vidrio volcánico fresco, desvitrificado o alterado, las texturas se denominan intersertal (<30% de vidrio) o hialoofítica (entre 30 y 80%), ambas comunes en la pasta de las rocas basálticas (González 2008). La presencia de cavidades primarias como vesículas y amígdalas -producidas por cavitación durante la extrusión de una colada basáltica en superficie- da lugar a la textura vesicular cuando las cavidades están vacías, y a la amigdaloides, cuando están parcial o totalmente rellenas con minerales tardíos o post-magmáticos (González 2008). Por último, cuando las rocas tienen composición basáltica y un tamaño de grano intermedio se denominan diabasas (según el uso francés, alemán y americano, Le Maitre 2002). Cabe mencionar que ya no se utiliza el término *meláfiro* para denominar a basaltos muy antiguos.

Originadas a través de profundas fisuras o a partir de conos volcánicos, estas rocas pueden conformar extensos mantos, coladas y filones. El tipo de emplazamiento y la historia térmica del enfriamiento, generan cuerpos basálticos con estructuras densas, alveolares, amigdalares o, si hubo contacto con el agua, en almohadillas. Asimismo, son características a escala mesoscópica, las fisuras y diaclasas que exhiben estas rocas, las cuales pueden ser horizontales, verticales y con distintas geometrías.

La composición global y minoritaria, al igual que las características texturales y los rasgos estructurales, se relacionan con las propiedades físicas, mecánicas y de alteración que pueden presentar los diferentes tipos de basalto. Incluso dentro de una misma explotación puede haber diferencias que se manifiesten en los distintos frentes o en el mismo frente. No todos los basaltos pueden aplicarse para los mismos usos. Los estudios necesarios y los límites o parámetros para determinar sus aptitudes dependen del tipo de aplicación. En algunos casos existen normas, en otros se encuentran valores guía o simplemente recomendaciones. A continuación se mencionan algunos de ellos.

Usos de las rocas basálticas

Áridos

Las rocas basálticas son excelentes áridos naturales. Se obtienen a través de voladuras y se procesan en plantas de trituración y clasificación. Se usan como agregados para la elaboración de hormigones y mezclas asfálticas; así como también, para empedrados, drenajes, bases y sub-bases en la construcción vial; como balasto y sub-balasto en las vías del ferrocarril; para la protección ribereña y de taludes; entre otros.

Las aptitudes para cada aplicación se evalúan según los procedimientos y los límites fijados principalmente en las Normas IRAM, Reglamentos CIRSOC y los establecidos por

la Dirección Nacional de Vialidad (DNV) y Ferrocarriles Argentinos (FA). La normativa que corresponde a los áridos abarca procedimientos generales (toma de muestras, análisis granulométricos, etc.), así como también, normas para realizar los exámenes petrográficos (IRAM 1649) y determinar distintas propiedades tales como densidad, absorción de agua, porosidad, resistencia a la compresión, resistencia al desgaste (IRAM 1532), durabilidad (IRAM 1525), estabilidad (IRAM 1519), resistencia a la reacción álcali agregado (IRAM 1637, 1674), lajosidad y elongación (IRAM 1687-Parte 1 y 2), y muchas otras. En el caso del balasto los ensayos siguen la Especificación FA 7040-75 de Ferrocarriles Argentinos.

Es oportuno señalar al respecto que, si bien las propiedades físicas, mecánicas, químicas y de alteración que habitualmente se ensayan, están estrechamente relacionadas con la mineralogía, fábrica y grado de alteración que pueden presentar los basaltos; hay otras propiedades -importantes en la caracterización de los agregados- tales como la geometría (lajosidad, elongación), caras de fractura o limpieza de los áridos, que dependen más del proceso de trituración, que de la naturaleza del material (Bustillo Revuelta *et al.* 2014). Por ello, y a diferencia de las primeras, estas últimas pueden ser controladas y mejoradas con los ajustes necesarios en las plantas de producción.

A modo de ejemplo se muestran en el Cuadro 3.1 los valores mínimos y máximos obtenidos en rocas basálticas de la FSG (Misiones) que fueron ensayadas para uso vial.

| CUADRO 3.1: PROPIEDADES FÍSICAS Y TECNOLÓGICAS DE ALGUNOS BASALTOS DE LA FSG PROVINCIA DE MISIONES (ESCOBAR, J.A. 2001). | | |
|---|-------------|-------------|
| ENSAYOS REALIZADOS POR LA DPV MISIONES | | |
| Los valores corresponden a la fracción 6-19 mm. | Mín. | Máx. |
| Peso Específico Aparente | 2,94 | 3,01 |
| Absorción (% sobre muestra seca) | 0,56 | 2,28 |
| Desgaste Máquina de Los Ángeles (% de pérdida) | 15,00 | 17,60 |
| Ensayo de estabilidad por Inmersión en etilenglicol (% pérdida) | 0,00 | 28,40 |
| Ensayo de durabilidad por ataque con sulfato de Na (%) | 2,28 | 5,45 |

Un requisito esencial en todas las aplicaciones y para los áridos en general, es que las propiedades se mantengan estables en relación con potenciales reacciones que pueden tener lugar ante condiciones de humedad, cambios de temperatura, álcalis del cemento, entre otros. En este sentido y como ya fue señalado, para las rocas basálticas, la mineralogía secundaria es un factor crítico ya que está asociada a procesos indeseables de degradación (por ejemplo, Rimoldi *et al.* 1975, Iñiguez 1977). Dichos procesos vienen dados principalmente por la presencia -en determinadas proporciones- de minerales expansivos, de ciertas zeolitas y de formas amorfas o criptocristalinas de la sílice.

Los minerales expansivos son indeseables porque ante cambios de humedad varían su volumen y al hacerlo pueden provocar agrietamientos y hasta la destrucción total de la roca. El ensayo IRAM 1519 se utiliza para verificar la presencia de estos componentes en litologías basálticas. No obstante, para conocer el tipo, proporciones y distribución de los mismos, es necesario recurrir a otras técnicas tales como análisis de DRX, estudios petrográficos, etc. Para el uso en hormigones el Reglamento CIRSOC establece que las pérdidas por inmersión en etilenglicol (IRAM 1519) deben ser menores al 10%.

Poklepovic y Silva (2012), describen el proceso de deterioro conocido como efecto “sonnenbrand”, observado en algunos basaltos alcalinos de la provincia de Córdoba. Según explican estos autores la degradación de los agregados -utilizados en obras viales- se manifiesta en un período de 6 a 24 meses. Comienza con manchas blanquecinas a partir de las cuales se generan grietas que provocan la desintegración de la roca. Se da en basaltos con composiciones alcalinas y portadores de nefelina y analcima. El trabajo señala la necesidad de contar -a nivel nacional- con un procedimiento de ensayo que permita evidenciar estos problemas.

Con respecto a la reacción álcali-sílice (RAS), la misma se produce cuando ciertas formas de la sílice (ópalo, vidrio volcánico, tridimita, cristobalita o calcedonia) están presentes en los agregados (entre 1 y 5%) y reaccionan con los hidróxidos alcalinos (sodio y potasio) del cemento. Como consecuencia de esto se forman geles que en condiciones de humedad y con temperaturas de 10 a 38° C, se hidratan y expanden generando roturas en el hormigón que pueden provocar distintos grados de deterioro en las estructuras (Bustillo Revuelta *et al.* 2014). Esta reacción se menciona particularmente para los basaltos de la FSG debido a que, por su carácter tholeítico, estas rocas tienen composiciones sobresaturadas en sílice que favorecen la formación de las especies antes mencionadas (Avid *et al.* 2014). La resistencia a esta reacción se determina a través de ensayos IRAM, siendo el límite de expansión admitido de 0,1% (IRAM 1674). No obstante, Avid *et al.* (2014) advierten que estos métodos de control podrían no ser del todo idóneos para calificar a los agregados de FSG; ya que las expansiones atribuidas al RAS también podrían deberse, en parte, a los minerales arcillosos que pueden estar presentes en estas rocas.

Otras aplicaciones industriales

En el campo cerámico los basaltos tienen aptitudes como fundentes, para la elaboración de vidriados y esmaltes y como materia prima en la industria vitrocerámica.

Los fundentes son componentes que bajan el punto fusión de las mezclas cerámicas. Para ello son muy utilizados, por ejemplo, los feldespatos, especialmente los alcalinos (albita, microclino y ortosa). Estos minerales actúan formando fases vítreas a temperaturas relativamente más bajas y como introductores de álcalis (Mari 1998). Algunas rocas volcánicas, entre ellas los basaltos, son consideradas aptas para sustituir a estos minerales en ciertas composiciones cerámicas.

Los vidriados y esmaltes son vidrios en los que predominan óxidos de bajo punto de fusión llamados también fundentes (Mari 1998). Cuando son transparentes y no hay agregado de pigmentos u otros productos, se habla de vidriados, de lo contrario, se denominan esmaltes (Mari 1998). Estos materiales se utilizan para dar color y/o decoración a las piezas cerámicas, para alisar su superficie e impermeabilizarla, así como también para aumentar su resistencia química y mejorar sus propiedades mecánicas (Durán 2002). La obtención de esmaltes a partir de rocas basálticas también cuenta con antecedentes.

Los vitrocerámicos, por su parte, son materiales que se forman a partir de la nucleación y cristalización controlada de vidrios (Holand y Beall 2012). Pueden ser formulados a partir

de materias primas de síntesis y/o de materias primas naturales como rocas y minerales. En el primer caso, se denominan materiales vitrocerámicos, mientras que en el segundo, se los conoce como materiales petrúrgicos. Por su baja temperatura de fusión (entre 1100 y 1300° C) y por la menor viscosidad de sus fundidos -lo cual facilita su procesado- el basalto tiene aplicación como materia prima petrúrgica (Vicente – Mingarro *et al.* 1993).

Si bien para usar estas rocas -como fundentes o en la formulación de esmaltes- no se dan especificaciones técnicas precisas, trabajos publicados sobre estos temas, brindan información sobre los estudios necesarios, los resultados experimentales obtenidos y en algunos casos, orientaciones sobre factores condicionantes. Para las aplicaciones vitrocerámicas, en cambio, sí existen algunas metodologías de evaluación basadas principalmente, en criterios químicos y mineralógicos.

Para establecer las propiedades fundentes de un basalto es necesario preparar mezclas con componentes plásticos como caolín, arcilla blanca, arcilla roja, bentonita, etc. Para ello, se utilizan distintos porcentajes de basalto molido y temperaturas de cocción que varían en un rango de 900 a 1300° C. Los estudios necesarios abarcan la determinación de las composiciones químicas y mineralógicas de todas las materias primas utilizadas y de propiedades tales como la fusibilidad y viscosidad a alta temperatura relacionadas con los intervalos de cocción. Los efectos de la temperatura y de la adición de basalto en las propiedades cerámicas, se investigan a través de medidas de contracción lineal, densidad, porosidad, absorción de agua, resistencia mecánica, dureza, entre otros. También son importantes las fases cristalinas neoformadas y la textura que adquieren las piezas una vez calcinadas.

Estrada y Espinoza de Los Monteros (1980), en su publicación sobre el ahorro de energía a través del empleo de nuevas composiciones cerámicas, mencionan la potencialidad de las rocas volcánicas como materia prima para la elaboración de cerámicos de la construcción. Estos autores citan por ejemplo, los estudios de Moroz *et al.* (1976), que ensayaron mezclas de basalto con arcillas montmorilloníticas y caolinítico-hidromicáceas, utilizando temperaturas de cocción relativamente bajas (950 a 1150° C). Según mencionan con adiciones de hasta un 50% de basalto la temperatura de cocción disminuye y las propiedades físicas de los productos mejoran. Se pueden citar también los trabajos de Sallam *et al.* (1982) que estudiaron los efectos de la adición de rocas basálticas -de composición entre tholeítica y alcalina- en mezclas realizadas con caolín (china clay). Sus resultados muestran la obtención de menores temperaturas de sinterización y de buenas propiedades físico-mecánicas logradas con proporciones de hasta 20-25% de estas rocas. Tcheichvili y Hevia (1982) investigaron las aptitudes de los basaltos en la cerámica de construcción para revestimientos de pisos y paredes, externos e internos y en cerámica fina para vajilla. La roca fue empleada como componente principal en mezclas con arcilla blanca y arcilla roja, junto con otros componentes plásticos como caolín lavado y bentonita, estos últimos agregados en menor medida. Realizaron ensayos por prensado, colado y torneado y utilizaron temperaturas de cocción entre 1000 y 1250° C. Estos autores observaron que, entre otros, con un mayor contenido de basalto (>50%) la sinterización completa se logra a temperaturas menores (de 1150-1250° C a 1100-1150° C). No obstante,

comprobaron también que proporciones más altas de basalto aumentan el riesgo de que se produzcan deformaciones en los productos, debido al corto intervalo de sinterización y ablandamiento que presentan estas mezclas. Naga y Abou El-Maaly (1994) emplearon basaltos alcalinos ricos en olivina para estudiar la viabilidad de su uso como aditivo para la preparación de pastas cordieríticas. Para ello seleccionaron las muestras con mayor proporción de olivina (hasta un 27%) debido a sus contenidos relativamente más altos de óxidos de magnesio y hierro y más bajos de CaO. Concluyeron que con rangos de 17-19% se obtiene la máxima formación de cordierita y que con proporciones por encima del 27,5% se reduce la temperatura de vitrificación y se produce la disolución de la cordierita en la fase líquida.

De manera similar, pero como alternativa de reciclado, algunos residuos de composición basáltica -generados a partir del lavado de triturados gruesos- han sido considerados para su aprovechamiento en cerámica roja para elaborar ladrillos, azulejos y artesanías. Rebmann *et al.* (2001) estudiaron los efectos de la mezcla de estos residuos con arcillas de la región de Río Verde (Mato Grosso, Brasil). Los finos basálticos, producidos durante la trituración, resultan indeseables debido a que su adherencia aumenta la superficie específica de los áridos y trae como consecuencia un mayor consumo de cemento en aplicaciones, como por ejemplo, la elaboración de hormigón. El trabajo indica que el uso de estos subproductos en cerámica roja es una alternativa viable. No obstante, señalan que su utilización como relleno puede lograrse hasta los 900° C y en concentraciones bajas (hasta 30%). Por encima de los 1100° C y en concentraciones más altas (>30%) las propiedades cerámicas cambian en función de las proporciones de filler utilizadas. Asimismo, sugieren que a temperaturas cercanas a 1200° C se podrían usar para obtener esmaltes rústicos. En este mismo sentido, Hevia (2006), da a conocer la experiencia de mezclar residuos procedentes de una planta de producción de porcelanato, con basalto como componente adicional. Según informa este autor, los mencionados residuos resultaron aptos para el uso cerámico al igual que el agregado de basalto (7-21%) que permitió mejorar la textura, densidad aparente y conductividad térmica de los productos obtenidos.

Siguiendo con las aplicaciones cerámicas, pero en el campo de los esmaltes, Tcheichvili y Hevia (1982) también probaron formulaciones con diferentes porcentajes de basalto utilizando varias técnicas de esmaltado, sobre piezas verdes y calcinadas. Los mejores resultados los obtuvieron a través del prensado simultáneo de la pasta y del esmalte en polvo para tratamientos de monococción. Estos autores señalan que es posible obtener piezas autoesmaltadas, con agregados de 60% de basalto y temperaturas de 1160° C, y con 40% de basalto y temperaturas de 1175° C, en pastas para colado y torneado, respectivamente. Martínez Manent (1989) realizó su tesis doctoral (Universidad de Valencia) sobre este tema. Para ello utilizó distintas composiciones con basalto como componente principal y como colorante de fritas comerciales. También se pueden citar las publicaciones de Hevia y Bustos (1991) y de Hevia (2006). En estos trabajos se presentan los desarrollos tecnológicos realizados para obtener esmaltes que podrían aplicarse, por ejemplo, en la fabricación de porcelanas técnicas y de materiales de revestimiento, así

como también, en cerámica artística. Las experiencias se llevaron a cabo con basalto como componente principal, en distintas proporciones (50 a 80%), en composiciones con dos fritas diferentes –una boro cálcica y otra plúmbico bórica- y con el agregado de una arcilla plástica y otra bentonita. Debido al rango de temperaturas, más o menos amplio, entre el punto de fusión y el de fluidez (de 60 a 90° C) los esmaltes obtenidos presentaron superficies tersas y espejadas. La verificación de durezas de entre 7 y 8 (según la escala de Mohs); de coeficientes de expansión térmica de 6,6 a 5,8; de resistencias altas a la acción de los ácidos y de los álcalis; así como también, la valoración estética de colores en la gama del marrón obtenidos con temperaturas de cocción entre 1080-1250° C, llevaron a los citados autores a concluir positivamente sobre las aptitudes del basalto ensayado para su uso en la formulación de esmaltes y vidriados.

Con respecto a las aplicaciones petrúrgicas, según Vicente-Mingarro (1993), los primeros experimentos para obtener materiales vitrocerámicos a partir de rocas volcánicas datan del siglo XVIII, mientras que la primera patente sobre fusión y moldeo de basaltos fue registrada en el siglo XIX. El mismo autor destaca que estos desarrollos comenzaron en Europa del Este, para luego expandirse a otros países como el Reino Unido, Italia, Austria, Estados Unidos, Alemania y Japón. Durante las décadas de 1980 y 1990 el tema cobró bastante interés académico en España donde se realizaron algunas tesis doctorales (Perez Arencibia 1988, Queralt Mitjans 1988, Vicente-Mingarro 1993) y publicaciones sobre el potencial petrúrgico de basaltos procedentes del archipiélago de las Islas Canarias (por ejemplo Queralt Mitjans *et al.* 1983, De la Fuente *et al.* 1990, Vicente-Mingarro *et al.* 1990, Vicente-Mingarro *et al.* 1992). Para Argentina se pueden citar sobre este tema las contribuciones de Hevia y Boggio 2000 y Hevia 2006, que tratan sobre la aptitud vitrocerámica de rocas basálticas procedentes de la provincia de Neuquén. En todos estos trabajos, el basalto es considerado como una materia prima alternativa con buenas oportunidades de industrialización.

Los vitrocerámicos de basalto se obtienen por vía petrúrgica o por vía sinterizada y se caracterizan por su gran inercia química, baja velocidad de lixiviado, baja conductividad eléctrica, alta resistencia a la abrasión y buena resistencia mecánica (Vicente-Mingarro *et al.* 1993). Estas propiedades los hacen aptos para aplicaciones en la industria (química, minera, textil y otras) y también como materiales de construcción. Hace décadas que se comercializan por ejemplo, pavimentos industriales y de interior, alcantarillas, tubos, piezas para tolvas, etc. fabricados a partir de la fusión y moldeo de rocas basálticas (cast fused basalt - Figura 3.3). Estos fundidos basálticos también son aptos para aplicaciones ambientales, como por ejemplo, para la fabricación de matrices vitrocerámicas para la inmovilización y aislamiento de residuos radioactivos y residuos tóxicos industriales (Vicente-Mingarro *et al.* 1993).

En cuanto a las propiedades que deben investigarse para establecer la idoneidad de las materias primas, todos los trabajos revisados centran su atención en la composición química y mineralógica de los basaltos. Así por ejemplo, Queralt Mitjans *et al.* 1983 realizaron un estudio sobre las posibles aplicaciones vitrocerámicas de algunos basaltos de La Gomera (Islas Canarias). En el trabajo explican que la composición química y

mineralógica son factores significativos para determinar la idoneidad de las materias primas. En el primer caso es fundamental la presencia y cantidad de agentes nucleantes que, tras la fusión de la roca, puedan favorecer la formación de estructuras cristalinas adecuadas. Mencionan a los óxidos Fe_2O_3 y Fe_2O y a la relación entre ambos, así como también, a los óxidos de TiO_2 y P_2O_5 . Señalan que el estado de oxidación del hierro es el principal control de nucleación y crecimiento de los cristales e indican que lo ideal es que la relación $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}$ sea superior a 1. Para el TiO_2 citan porcentajes de hasta 11% y para el P_2O_5 contenidos entre 0,5 y 6%. Adicionalmente advierten que los elementos alcalinos no deben estar presentes en cantidades superiores al 4% por el aumento de viscosidad que implican. Con respecto a la composición mineralógica exponen que su determinación es útil para predecir la estructura final por la analogía que puede darse entre las fases neoformadas y la materia prima inicial. En este campo también existen algunas metodologías de evaluación basadas en la composición química y en la utilización de cálculos petroquímicos. Varias de ellas son revisadas y comparadas en el estudio de De la Fuente *et al.* 1990. En este trabajo, donde se evalúan las posibilidades vitrocerámicas y petrúrgicas de basaltos de las Islas de El Hierro y Lanzarote (Islas Canarias), se aplicaron en particular, los diagramas de Ginsberg, Raschin-Tschetveritkov y Lebedeva. El Cuadro 3.2 resume los criterios químicos, mineralógicos y petrográficos que, de acuerdo a estas publicaciones, se podrían considerar a priori, en relación con la idoneidad de los basaltos.

CUADRO 3.2: CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES PARA EL USO DE ROCAS BASÁLTICAS COMO MATERIA PRIMA PETRÚRGICA SEGÚN DE LA FUENTE *et al.* 1990.

| | |
|-----------------------|---|
| Composición química | Constante, sin cambios bruscos en el yacimiento. La composición porcentual no es lo más condicionante, sino la capacidad de los componentes de organizarse entre sí para formar estructuras estables durante la devitrificación. Cantidades apreciables de elementos que puedan actuar como agentes nucleantes y favorezcan texturas que mejoren las propiedades finales. Elevado porcentaje de TiO_2 , óxidos de Fe y P_2O_5 , todos ellos con acción nucleante e influyente en el desarrollo cristalino, permite predecir el buen comportamiento en el proceso devitrificado. Tolerancia de los elementos alcalinos: no deben superar el 4%. |
| Mineralogía | <10 % de olivina. Este mineral origina aumentos en el punto de fusión y la formación de núcleos inmiscibles en el fundido lo que ocasiona mayor fragilidad a los productos finales. Basaltos monopiroxénicos. |
| Textura y Estructura | Afanítica, equigranular, sin fenocristales. Densa o masiva, sin xenolitos, filones de cuarzo u otros minerales secundarios (zeolitas, carbonatos, etc.) |
| Alteración de la roca | En general contraproducente, aunque también se considera que los procesos de alteración eliminan a las olivinas, lo cual facilita el proceso petrúrgico. |

Otro material petrúrgico que tiene escala industrial es la fibra de basalto o lana de roca. Son productos similares a las fibras de vidrio y se utilizan como aislantes térmicos y acústicos en la construcción, industria automotriz, construcción de barcos, aspas de molinos de viento, etc. (Singha 2012). También tienen aplicación como refuerzos en materiales compuestos con hormigón, epoxi, y otros (Černý *et al.* 2012) y en la fabricación de suelo artificial (Cáceres Alvarado 1995). Por sus características las fibras de basalto son vistas como un buen reemplazo para las fibras de asbesto (Schiavon *et al.* 2007) y como competencia para los productos E-glass y S-glass, debido a que presentan propiedades semejantes y costos relativamente buenos (Černý *et al.* 2012).

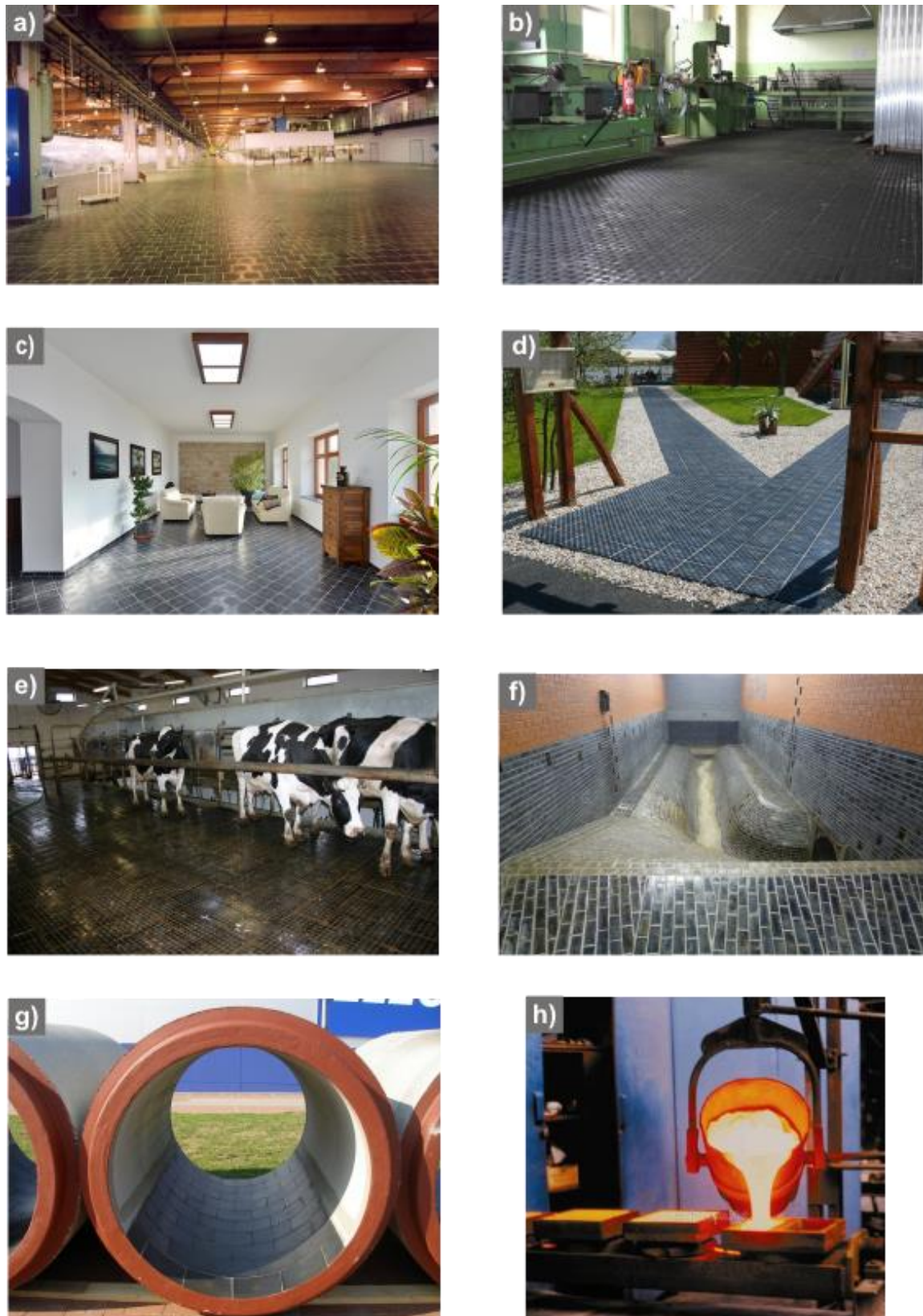


Figura 3.3: Productos de la firma EUTIT S.R.O. (Rep. Checa) fabricados a partir de la fusión y moldeo de rocas basálticas (cast fused basalt). Fotografías a, b y e) Pavimentos industriales. c) Revestimientos interiores. d) Revestimientos exteriores antideslizantes. f) Sistemas de alcantarillado. g) Tubos con alta resistencia química y a la abrasión. h) Proceso de fabricación: la materia prima se funde a 1280-1200° C y se coloca en moldes de metal o sílice y se enfría de manera controlada en hornos por 16-21 horas para producir la re-cristalización. Las fotografías y la información fueron tomadas de <http://www.eutit.com/>.

Con respecto a los requisitos para las materias primas, la información es escasa posiblemente porque las investigaciones en este campo están muy relacionadas con los secretos industriales. Algunos trabajos destacan la importancia de la composición química -tanto para el proceso de fabricación como para las propiedades resultantes- y aseguran que solo ciertas composiciones pueden ser usadas para hacer filamentos (Singha 2012). Otros en cambio, sostienen que el proceso de fabricación y la calidad exigida a los productos finales, pueden ser factores más condicionantes que la composición química y mineralógica de la materia prima (Lorenz y Gwosdz 2004 y Dalinkevich 2012).

Rusia fue pionera en la investigación y producción de lana mineral a partir de rocas basálticas. Actualmente estos materiales se producen en varios países de Europa del Este, Dinamarca, Alemania, Francia, España y Estados Unidos. En Argentina se fabrican en la provincia de San Luis y se comercializan como lana mineral o termolana a base de rocas basálticas (<http://www.termicasanluis.com.ar>).

Aplicaciones ornamentales

La aptitud ornamental de una roca se define por sus características intrínsecas (propiedades mecánicas, químicas, etc.); por sus posibilidades de explotación (por ejemplo, la forma y dimensiones de los bloques obtenibles) y; por la valoración estética de su color, textura, tamaño de grano y demás cualidades ligadas a los propósitos ornamentales (Bradley 1989).

Los ensayos tecnológicos de caracterización para estos usos abarcan determinaciones de densidad y absorción (IRAM 10602); resistencia a la compresión (ASTM C170-09); resistencia a la flexión (ASTM C880/C880M-09); resistencia al desgaste (método Dorry); resistencia a agentes químicos (IRAM 11836); y otros. También se utilizan los ensayos de durabilidad (IRAM 1525) y estabilidad para rocas basálticas (IRAM 1519).

La realización de estos ensayos se establece según el empleo pretendido. Así por ejemplo, para revestimientos internos de paredes son importantes la absorción de agua, la resistencia a la compresión y la dilatación térmica; mientras que, para el uso en fachadas, a estas propiedades se deben sumar los valores de resistencia a la flexión, acabado superficial y grado de alterabilidad (Frasca 2002).

No se encontraron muchas referencias sobre la aplicación ornamental de basaltos. Entre las localizadas, se puede citar la información que brindan Lorenz y Gwosdz (2004) sobre el uso de basaltos compactos -en obras exteriores e interiores- con distintos tipos de acabado (Cuadro 3.3 y Cuadro 3.4), y algunos valores guía que se muestran en el Cuadro 3.5.

CUADRO 3.3: APLICACIÓN ORNAMENTAL DE BASALTOS COMPACTOS EN OBRAS EXTERIORES SEGÚN MÜLLER (1996). SIMPLIFICADO DE LORENZ Y GWOSDZ 2004.

| Poco labrado | | Labrado | | Lijado | | Pulido | |
|--------------|-----------|----------------------|-------------------|---------|-------------------------------------|--------------------|-----------------------|
| Mampostería | Adoquines | Escultura grosera | Escultura Fina | Solería | Fachadas, Lápidas, Monumentos | Fachada Paredes | Lápidas Monumentos |
| X | X | X | X | XXX | XXX | XXX | XX |

Referencias: xxx= muy adecuado, xx adecuado, x= todavía adecuado

CUADRO 3.4: APLICACIÓN DE BASALTOS COMPACTOS EN OBRAS INTERIORES SEGÚN MULLER (1996). SIMPLIFICADO DE LORENZ Y GWOSDZ 2004.

| Lijado y pulido fino | | |
|----------------------|--------------------|---------------------------|
| Solería | Escalones, repisas | Tablero sin revestimiento |
| X | X | X |

Referencias: xxx= muy adecuado, xx adecuado, x= todavía adecuado X

CUADRO 3.5: VALORES GUÍA SEGÚN NORMAS DIN SELECCIONADOS DE LA RECOPIACIÓN DE LORENZ Y GWOSDZ 2004.

| Densidad real | Densidad aparente seca | Adsorción de agua | Expansión Térmica | Resistencia a la compresión | Resistencia a la flexión | Resistencia al impacto (agr. gruesos) |
|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| g/cm ³ | g/cm ³ | % | mm/m 100°C | N/mm ² | N/mm ² | % |
| 3,00-3,15 | 2,85-3,05 | 0,1-0,3 | 0,90 | 250-400 | 13-25 | 9-20 |

Con respecto a las dimensiones y formas de los bloques para el procesado ornamental, Bradley (1989) menciona volúmenes promedio para producciones -de gran escala- comprendidos entre 8 y 10 m³. Asimismo indica que valores inferiores al metro cúbico son solo aceptables para materiales de elevada calidad y que los valores máximos rondan los 12 m³. Stein (1986), citado en Lorenz y Gwosdz (2004), considera que el tamaño debería ser >1,5 m³. Datos nacionales (De Maio *et al.* 2000) hacen referencia a volúmenes de 3 m³ para la comercialización de bloques en bruto. En cuanto a la forma, las más usuales son los paralelepípedos con geometrías y dimensiones acordes a la maquinaria de aserrado y a los productos que se busca obtener. En este sentido, la elaboración de ciertos productos a partir de rocas basálticas -como ser losas aserradas- podría verse condicionada por el tamaño mínimo extraíble. Dicho factor se relaciona con el grado de diaclasamiento natural y la distribución espacial que pueden presentar las discontinuidades en los afloramientos de estas rocas. Valores guía para la producción de losas de fachada, citados por ejemplo por Lorenz y Gwosdz 2004, especifican medidas mínimas de longitud ≥ 1 m, ancho ≥ 1 m y espesor $\geq 0,4$ m.

En relación con la valoración estética de los basaltos, se trata de un campo subjetivo y cambiante relacionado con tendencias y posibilidades comerciales. Estas rocas tienen colores oscuros en la gama del gris y negro y texturas de grano fino a medio, similares – desde un punto de vista estético- a otros materiales volcánicos conocidos y comercializados en el mercado nacional e internacional, como por ejemplo, algunos pórfidos patagónicos y el producto italiano conocido como *Basaltina*.

Como antecedentes del interés sobre este uso se pueden citar los trabajos de Bertotto y Tickyj (2008) que estudiaron rocas basálticas de la provincia de La Pampa con el fin de determinar sus potenciales aplicaciones ornamentales y Ciccioli y Schalamuk (2009) que realizaron una caracterización básica sobre basaltos procedentes de Eldorado y Oberá (Misiones), la cual forma parte de este capítulo. La Figura 3.4 muestra algunos de los usos ornamentales que actualmente tienen las rocas basálticas de la FSG.

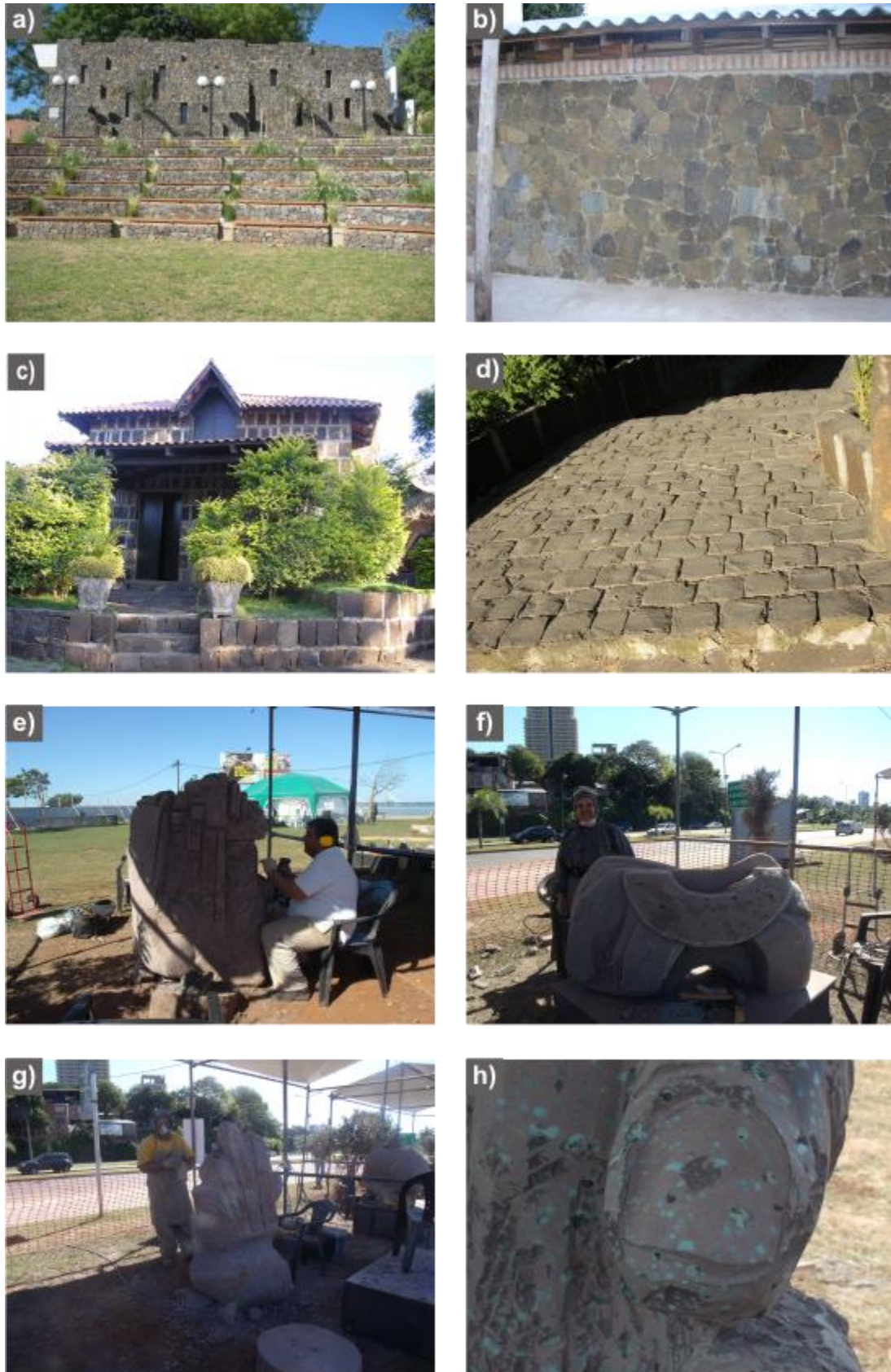


Figura 3.4: Usos ornamentales de rocas basálticas de la FSG. Fotografías a, b) Revestimientos exteriores contruidos con bloques con formas irregulares (Misiones, Argentina); c, d) Utilización de bloques con forma y tamaños regulares colocados en fachadas y pisos (Santa Catarina, Brasil); e-h) Esculturas realizadas en rocas basálticas. Para el tallado de todas las esculturas se utilizaron variedades vesículo-amigdalares por ser relativamente menos duras que las masivas (Misiones, Argentina).

Enmiendas minerales

Finalmente las enmiendas minerales (*stonemeal*) son otra posible aplicación de las rocas basálticas (Lorenz y Gwosdz 2004).

Se trata de una práctica ligada a procesos productivos agroecológicos que tiene por objetivo mejorar suelos degradados o empobrecidos a través de la utilización de polvos de roca. Los principales beneficios que se le reconocen a esta técnica son la provisión de macro y micro nutrientes; mejoras del pH de los suelos; aumento de la capacidad de intercambio catiónico y costos bajos o ningún costo si se aprovechan los residuos minerales de las canteras y plantas de trituración de áridos (Theodoro y Leonardos 2006). No obstante, es importante señalar que, con respecto a los fertilizantes químicos, la liberación de nutrientes es más lenta, por lo que no puede ser considerada simplemente como un reemplazo. Su efectividad requiere la combinación con otros métodos de manejo del suelo para que los nutrientes se tornen disponibles por la acción de los ácidos orgánicos producidos por la microbiota y las raíces de las plantas (Pereira Da Silva *et al.* 2015).

En Brasil las enmiendas minerales (*rochagem*) fueron reconocidas (1980) como fuente de nutrientes (Ley 6894) y también como insumos agrícolas (2013) (en Pereira Da Silva *et al.* 2015). Gran parte de los suelos brasileños tienen bajas fertilidades debido a que cuentan con poca materia orgánica y baja capacidad de intercambio catiónico. El incremento de los costos de los fertilizantes químicos (2007-2008), sumado a la demanda creciente de los mismos, impulsó la creación algunas líneas estatales de investigación agrícola para identificar fuentes alternativas de nutrientes. Si bien, estos temas tienen antecedentes desde la década de 1970 (Leonardos *et al.* 1976), en los últimos años, los trabajos realizados reflejan un creciente interés por estas posibilidades. En líneas generales se trata de estudios en los que se comparan los resultados obtenidos utilizando polvos de rocas basálticas y de otras composiciones (Theodoro y Leonardos 2006) y fertilizantes comerciales. Estas experiencias se llevan a cabo en colaboración con pequeños agricultores (Theodoro y Leonardos 2006), en campos de investigación (Ribas Sékula 2011) o en viveros (Knapik y Angelo 2007). Los estudios incluyen análisis químicos, DRX, FRX, análisis de la fertilidad agronómica y la cuantificación de los rendimientos obtenidos según los cultivos empleados. Si bien la naturaleza de la roca es un factor muy importante no es el único condicionante para el éxito de esta práctica. El tiempo de los tratamientos, los manejos previos realizados al suelo y la actividad biológica ligada a la solubilización de los minerales, son aspectos relevantes que deben ser tenidos en cuenta al evaluar el potencial agronómico de esta alternativa.

De lo referido hasta aquí y como ya fue mencionado en la introducción, los basaltos de la FSG -así como los de otras zonas del país- han sido utilizados hasta ahora fundamentalmente como áridos y, como tales, sus propiedades son las más conocidas. Si bien, se efectuaron algunos estudios para aplicaciones cerámicas y ornamentales, el conocimiento sobre la viabilidad de éstos y, otros usos, aún está poco desarrollado a nivel local en relación con estas rocas. Debido a ello y a los fines de aportar información sobre algunas de estas posibilidades, se efectuaron los estudios cerámicos y ornamentales que se presentan a continuación.

Estudios de aptitud para uso cerámico

Materiales y métodos

Materias primas

Para los estudios de aptitud cerámica se utilizaron tres muestras basálticas. Una de ellas (CELD 004) es una roca (Figura 3.5-a) que fue obtenida a partir del muestreo realizado para la caracterización geológica de la zona de estudio (capítulo 2), la cual fue molida y tamizada ($T_{100} < 149 \mu\text{m}$). Los otros dos materiales basálticos, denominados RF (T y A), corresponden a residuos finos ($T < 100$) colectados en diferentes sectores de una planta vial-de tratamiento de áridos (RFT) y fabricación de asfalto (RFA)- localizada en la zona centro de la provincia.

Como componentes plásticos se emplearon dos arcillas locales conocidas en Misiones como “ñau”. Se trata de depósitos aluvionales recientes, utilizados en algunos casos para la elaboración de ladrillos y cerámica artesanal. Una de las muestras (SR5), fue tomada de un depósito expuesto a partir de excavaciones viales (obra básica de la Ruta Provincial N° 5, Figuras 3.5-e y 3.5-f) y la otra (SO), de un acopio utilizado por la Facultad de Artes de la Universidad Nacional de Misiones, para la fabricación de cerámica artística. En ambos casos se tomaron muestras representativas de 10-15 kg.

Caracterización de las materias primas

Las características químicas y mineralógicas de CELD 004 fueron determinadas según los métodos que se describen en el capítulo 2 de este trabajo. La caracterización de los residuos basálticos y de los materiales arcillosos fue llevada a cabo mediante análisis químicos de elementos mayoritarios por ICP/AES (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy) y la identificación de las especies minerales presentes por difracción de rayos X (DRX). El análisis de DRX se efectuó utilizando un difractómetro Philips 3020 con radiación Cu-K- α y filtro Ni a 40 Kv-20 mA. Los difractogramas de las diferentes muestras se obtuvieron en polvo ($T < 100$, condición desorientada) y se realizaron entre 3 y 70° 2 θ en pasos de 0,04 ° (2 θ) y 2 s por paso. Para los materiales arcillosos se hizo un estudio adicional con la fracción $< 2 \mu\text{m}$ (condición orientada) seca, con tratamiento térmico a 550° C-2 horas y después de la saturación con etilenglicol 60° C durante 24 horas. En este caso el intervalo observado fue 3-32° 2 θ .

La distribución granulométrica de las muestras se obtuvo por tamizado en húmedo y se analizó la fracción $< 65 \mu\text{m}$ con un equipo Sedigraph. La preparación de las mismas consistió en dispersarlas en agua destilada mediante agitación en un equipo de ultrasonido durante 15 minutos.

El análisis térmico diferencial y termogravimétrico simultáneo ATD-TG fue realizado sobre la muestra total y sobre la fracción menor a 2 μm , en el rango de temperaturas comprendido entre 20° C y 1000° C. El ATD-TG se efectuó en un equipo NETZSCH STA 409 a una velocidad de calentamiento de 10° C/min.

El índice de plasticidad y los límites líquido y plástico fueron determinados según las Normas de ensayo de la Dirección Nacional de Vialidad VN-E3-65 y VN-E2-65.

El ensayo cono pirométrico equivalente (CPE) se efectuó con el método detallado en la Norma IRAM 12507.

Las Figuras 3.5-b, 3.5-c y 3.5-d muestran acopios de material basáltico triturado con distintas granulometrías.



Figura 3.5: Materias primas. Fotografías a) Afloramiento del basalto CELD 004 en la zona de estudio). b) Planta de tratamiento de áridos basálticos donde se observan acopios de material triturado con diferentes granulometrías (0/6, 6/19, y 19/32). c) Acopio de granulometría fina (0/6, binder basáltico) utilizado en la elaboración de mezclas asfálticas y productos de hormigón premoldeado. d) Planta de elaboración de hormigón premoldeado donde el binder es tamizado para separar las fracciones más finas que resultan indeseables para la fabricación de ciertos productos. El residuo resultante por lo general no es re-utilizado. e) Yacimiento de material arcilloso (ñau) expuesto en la Ruta Provincial N° 5 (Misiones). f) Extracción de la muestra SR5.

Preparación de probetas, secado y calcinación

Inicialmente se prepararon probetas para observar el comportamiento térmico del basalto, en particular la fusibilidad y la viscosidad a alta temperatura. Para ello se utilizaron las rocas obtenidas del muestreo efectuado para los estudios geológicos, entre ellas la muestra CELD 004, seleccionada para los ensayos cerámicos. Las muestras fueron reducidas por medio de una quebrantadora, cuarteadas y luego molidas en un equipo de impacto y fricción marca HERZOG a una granulometría equivalente a la malla del T100 ($<149\ \mu\text{m}$). Las probetas se conformaron utilizando un ligante orgánico y se prensaron en forma de barras (Figuras 3.6-a y 3.6-b). Los cambios morfológicos se observaron a las temperaturas de 1000, 1100, 1150 y 1200° C.

Las masas cerámicas se prepararon con diferentes composiciones. Para ello se molieron las muestras arcillosas (SR5 y SO) hasta pasar el tamiz malla 40 y se adicionaron los basaltos (CELD 004, RFT y RFA) en proporciones que variaron entre 20 y 80% en peso. Las pastas se realizaron ajustando el contenido de agua a cada composición para obtener sistemas con consistencia adecuada y se acondicionaron por 48 hs. para asegurar una buena homogenización.



Figura 3.6: Preparación de probetas. a) Probetas de basalto T100 ($<149\ \mu\text{m}$) conformadas utilizando un ligante orgánico y prensadas en forma de barras. b) Probetas de basaltos procedentes de la zona de estudio preparadas para los ensayos térmicos. c) Probetas realizadas con el material arcilloso SO y el basalto CELD 004, en distintas proporciones (20, 40, 60 y 80%), y secadas a 100° C. d) Probetas calcinadas a diferentes temperaturas (entre 900 y 1100° C), preparadas con los materiales arcillosos SR5 y SO y las muestras basálticas CELD 004 y RFT.

Las probetas para la caracterización tecnológica se moldearon con la masa plástica en forma de barras de sección rectangular de 6x1x1cm. Posteriormente, se secaron a 100° C (Figura 3.6-c) y se caracterizaron por medidas de densidad, contracción y resistencia mecánica.

La densidad de la pieza seca se determinó como cociente entre el peso de la probeta seca (gr) y el volumen total de la pieza (cm³). Este último corresponde al volumen que ocupa el sólido con todos sus poros (abiertos y cerrados) y se calculó midiendo con un calibre las principales dimensiones de las probetas (largo, alto y ancho).

La densidad teórica (DT) de las mezclas de partida se calculó considerando la fracción en volumen y la densidad teórica de cada componente utilizando la siguiente ecuación:

$$DT = \sum \rho_i \cdot v_i$$

Donde ρ_i es la densidad de cada componente y v_i es la fracción en volumen en la mezcla.

La densidad relativa (DR) es el cociente entre la densidad de la probeta seca y la densidad teórica (se expresa como una magnitud adimensional). Conocida la densidad relativa, la porosidad total de la pieza seca (PT), que incluye a la porosidad abierta y cerrada, se calculó utilizando:

$$\text{Porosidad Total} = 1 - DR$$

La contracción se determinó como porcentaje a partir de la diferencia entre la longitud inicial de las piezas (antes del secado) y la longitud final seca, con la siguiente ecuación:

$$\text{Contracción (\%)} = \frac{\text{Longitud inicial} - \text{Longitud final}}{\text{Longitud inicial}} \times 100$$

La resistencia a la flexión -a temperatura ambiente- fue medida por el módulo de rotura MOR (σ_f). Para ello se utilizó una máquina de ensayo universal Instron 4483 donde las probetas son apoyadas en sus dos extremos y sometidas a una carga aplicada en el centro de las mismas. La resistencia a la rotura por flexión se expresa en MPa y se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot Q \cdot l}{2 \cdot w \cdot e^2}$$

Donde Q es la carga final de rotura (Newton), l es la luz de apoyo de la probeta, w es el ancho y e es el espesor la probeta.

Caracterización de las probetas calcinadas

Las probetas se calcinaron en un horno eléctrico -en atmósfera oxidante- a varias temperaturas comprendidas entre 900–1100° C (Figura 3.6-d). Las mismas se caracterizaron por medidas de densidad aparente, porosidad aparente, absorción de agua, contracción y resistencia mecánica (módulo de ruptura por flexión MOR en 3 puntos).

Las determinaciones de densidad aparente, porosidad aparente y absorción de agua se realizaron siguiendo los procedimientos descriptos en la Norma IRAM 12510. Para ello primero se midieron los pesos secos, suspendidos (peso de la probeta sumergida en agua) y saturados (peso de la probeta saturada de agua) y luego se aplicaron las siguientes ecuaciones:

$$\text{Volumen aparente (cm}^3\text{)} = \text{Peso saturado} - \text{Peso suspendido}$$

El volumen aparente (V) incluye los poros, huecos e intersticios del material y se utiliza para calcular la densidad aparente (D) con la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad aparente (gr/cm}^3\text{)} = \text{Peso seco} / \text{Volumen aparente}$$

La porosidad aparente o porosidad abierta (P) es el cociente entre el volumen de los poros abiertos y el volumen aparente del cuerpo y fue calculada de la siguiente forma:

$$\text{Porosidad aparente (\%)} = \frac{\text{Peso saturado} - \text{Peso seco}}{\text{Volumen Aparente}} \times 100$$

La absorción de agua (AA) se obtuvo a través del cociente entre el peso del agua absorbida y el peso seco. Para ello se utilizó la ecuación:

$$\text{Absorción de agua (\%)} = \frac{\text{Peso saturado} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} \times 100$$

La contracción lineal es la variación irreversible de longitud que ocurre cuando las probetas son sometidas a la acción del calor. Se calculó como porcentaje a partir de la diferencia entre la longitud inicial de las piezas (antes de la cocción) y la longitud final seca.

$$\text{Contracción (\%)} = \frac{\text{Longitud inicial} - \text{Longitud final}}{\text{Longitud inicial}} \times 100$$

Para las medidas de contracción el error experimental fue de 7,7% y de 2 y 3% para las de densidad aparente y porosidad aparente, respectivamente.

La resistencia a la flexión fue medida por el módulo de rotura MOR (σ_f) en una máquina de ensayo universal Instron. El MOR informado es el promedio de 5 medidas y se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot Q \cdot l}{2 \cdot w \cdot e^2}$$

Donde Q es la carga final de rotura (Newton), l es la luz de apoyo de la probeta, w es el ancho y e es el espesor la probeta. El error se estimó a partir de la desviación estándar y el valor medido. Se calculó como cociente entre la desviación estándar y el valor del MOR y varió aproximadamente entre 10-15%.

Las fases cristalinas formadas en los cerámicos sinterizados entre 900 y 1100° C fueron identificadas por medio de muestras en polvo (T100, 149 μm) utilizando un difractómetro Philips 3020 con radiación Cu-K- α y filtro de Ni a 40 kV-20 mA.

La Figura 3.7 muestra de manera esquemática las distintas etapas del trabajo experimental.

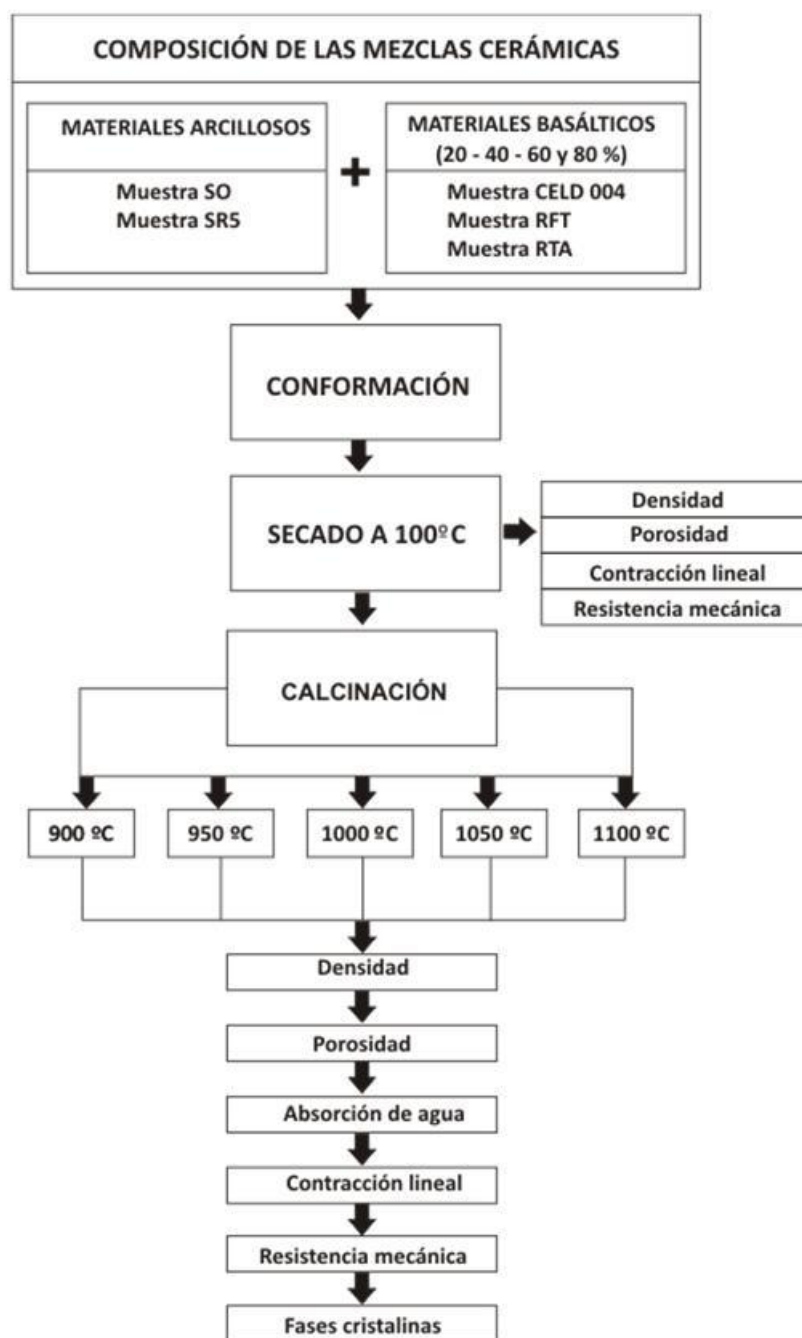


Figura 3.7: Esquema de trabajo de los estudios cerámicos.

Resultados y discusión

Caracterización de los basaltos empleados

El Cuadro 3.6 muestra la composición porcentual en óxidos de elementos mayoritarios de las muestras basálticas utilizadas. La clasificación geoquímica de estos materiales corresponde a basaltos tholeíticos. Este tipo de basaltos tiene menor contenido de Al_2O_3 (12-16%) en comparación con los calcoalcalinos (16-20%), mayor contenido de óxidos de hierro y titanio y menor cantidad de K así como también de Rb, Ba, U, Th, Pb, Zr y tierras raras livianas. Con respecto a las variedades alcalinas, los basaltos tholeíticos contienen mayor cantidad de SiO_2 y menos álcalis totales ($<\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ y $<< \text{K}_2\text{O}$).

CUADRO 3.6: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS MUESTRAS BASÁLTICAS (wt %)

| Composición Química | Basaltos empleados | |
|--------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| | Basalto Eldorado CELD 004 | Residuo Basáltico RF |
| SiO ₂ | 51,05 | 51,50 |
| TiO ₂ | 2,31 | 1,77 |
| Al ₂ O ₃ | 15,24 | 13,40 |
| Fe ₂ O ₃ | 13,19 | 13,70 |
| MnO | 0,19 | 0,20 |
| MgO | 4,26 | 6,11 |
| CaO | 9,55 | 9,93 |
| Na ₂ O | 2,56 | 2,40 |
| K ₂ O | 1,21 | 0,80 |
| P ₂ O ₅ | 0,44 | 0,19 |
| Total | 100,00 | 100,00 |

De acuerdo a los estudios realizados (Capítulo 2), el basalto CELD 004 es una variedad de color gris, densa o masiva, micro a macro cristalina, con textura intergranular (Figura 3.8), procedente de niveles próximos a la parte central de una colada.

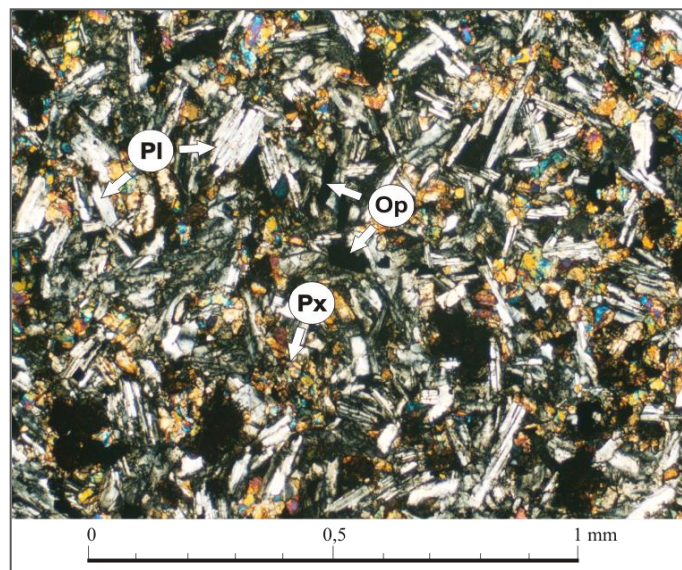


Figura 3.8: Sección delgada de la muestra CELD 004 con analizador. Basalto denso con textura intergranular. Referencias: Pl: Plagioclasa; Px: Piroxeno y Op: Minerales Opacos.

El estudio mineralógico y análisis por DRX (Figura 3.9) indica que está constituido principalmente de plagioclasas (labradorita) y piroxenos (augita); con óxidos de hierro (magnetita) como minerales accesorios y, trazas de ilmenita, cuarzo y olivina.

En los difractogramas de los residuos basálticos procedentes de la planta de trituración (Figura 3.9) se observaron las mismas especies minerales. La comparación de las intensidades relativas de las reflexiones características de las diferentes fases permitió determinar en estas muestras una mayor proporción de plagioclasa con respecto a la augita

y un leve aumento de cuarzo en relación a la plagioclasa. En la muestra RFA se identificó hematita.

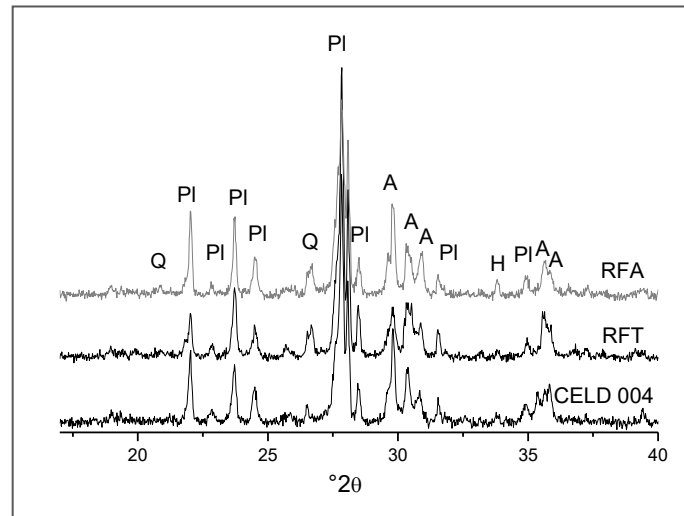


Figura 3.9: DRX del basalto utilizado CELD 004 y de los residuos basálticos RFT y RFA. Los difractogramas están ubicados uno sobre otro al solo efecto de comparar los picos de intensidad. Referencias: PI: Plagioclasa; A: augita; Q: cuarzo; H: hematita.

La distribución acumulativa de tamaño de partículas para los tres materiales basálticos mostró que el grado de molienda fue semejante (Figura 3.10). El contenido de la fracción <45 μm resultó cercano al 50% en peso, siendo el diámetro promedio d_{50} = 30 μm para la muestra RFA y, d_{50} = 45 y 50 μm para CELD 004 y RFT, respectivamente. La fracción menor que 2 μm alcanzó el 10% en la muestra RFA que es un material levemente más fino que los otros dos basaltos.

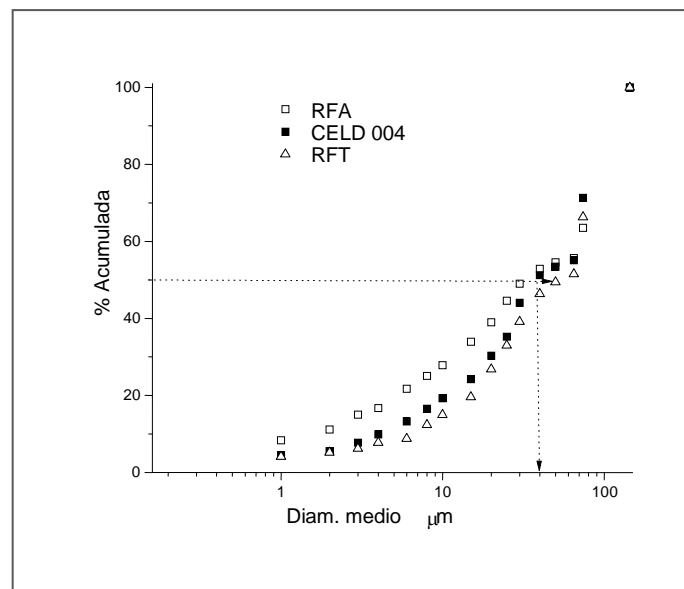


Figura 3.10: Comparación de las curvas de distribución de tamaño de partículas para las tres muestras de basalto.

A partir de la deformación de una probeta prensada sometida a la aplicación de un ciclo térmico con una velocidad de calentamiento de 10° C /min hasta 1200° C, se determinó que

la fusión del basalto ocurre cercana a los 1200° C. A 1100° C se observó el redondeamiento de las aristas de las piezas y a los 1150° C el comienzo de la deformación.

Caracterización de los materiales arcillosos utilizados

El análisis de DRX (Figuras 3.11 y 3.12) indica que la muestra SR5 es poco cristalina. Por las bajas reflexiones no fue posible distinguir claramente los componentes arcillosos presentes. No obstante, se identificó cuarzo, feldespato y hematita como minerales accesorios. En la fracción <2 µm es evidente la presencia de esmectita-minerales interestratificados Sm/illita como componente principal, acompañada de caolinita. Así se corrobora en los difractogramas de de la Figura 3.12 el desplazamiento del pico de la Sm hacia ángulos menores por solvatación con etilenglicol en tanto que las líneas de la caolinita desaparecen por calcinación a 550° C por la descomposición térmica.

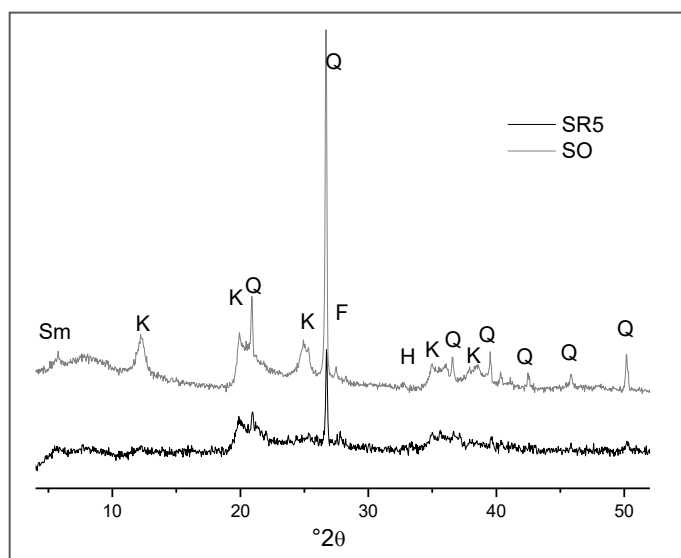


Figura 3.11: DRX de los materiales arcillosos SO y SR5. Muestra total (condición desorientada). Referencias: Sm=esmectita, K= caolinita, Q= cuarzo, F= feldespato.

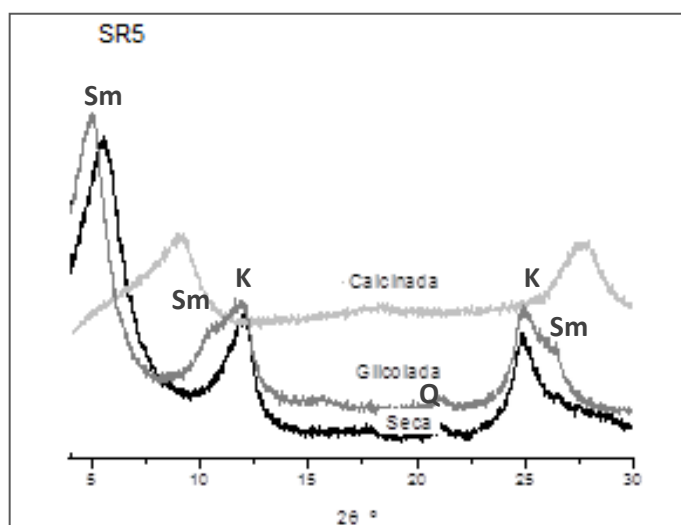


Figura 3.12: DRX de la muestra SR5. Fracción <2 µm (seca, calcinada y glicolada).

El análisis por DRX de SO (Figuras 3.11 y 3.13) indica que los minerales arcillosos de esta muestra están constituidos principalmente por caolinita de baja cristalinidad y esmectita;

además como minerales accesorios se reconocieron cuarzo y compuestos de titanio, en mayor cantidad que en la muestra SR5. Así las reflexiones características de la caolinita no se observaron en el difractograma de la muestra tratada a 550° C.

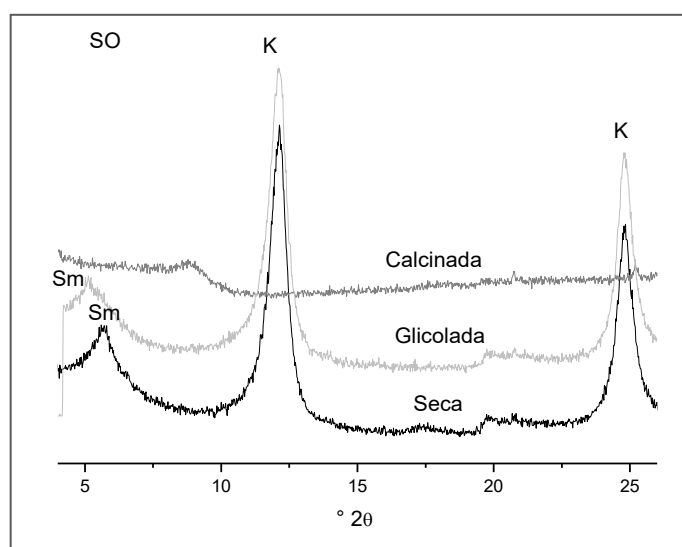


Figura 3.13: DRX de la muestra SO. Fracción <2 µm (seca, calcinada y glicolada).

El análisis químico de SR5 (Cuadro 3.7) indica que el componente principal es SiO₂ (47,0%), seguido por Al₂O₃ (19,2%) y Fe₂O₃ (18,66%). Entre los componentes minoritarios, el contenido de TiO₂ de 3,02% es elevado en relación con la proporción de óxidos fundentes K₂O + Na₂O (0,88%) y CaO + MgO (2,07%). La muestra SO presenta mayor contenido de SiO₂ (54,7%), lo cual se atribuye a la mayor proporción de cuarzo que tiene este material. El porcentaje de alúmina (23,02%) también es mayor, lo que se asocia con la abundancia de caolinita. La menor proporción de óxidos de hierro (5,5%) se relaciona con los bajos contenidos de hematita y/o goethita que presenta esta muestra, así como la mayor proporción de TiO₂ se atribuye a un mayor contenido de ilmenita/rutilo. El porcentaje de TiO₂ (5,39%) también es elevado en relación con la proporción de óxidos fundentes K₂O + Na₂O (0,37%) y CaO + MgO (0,50%).

CUADRO 3.7: COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL ARCILLOSO (wt %)

| Muestra | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | TiO ₂ | Pérdida por calcinación |
|---------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------|
| SR5 | 47,00 | 19,20 | 18,66 | 1,14 | 0,93 | 0,35 | 0,53 | 3,02 | 9,15 |
| SO | 54,7 | 23,02 | 5,50 | 0,38 | 0,12 | 0,09 | 0,28 | 5,39 | 10,1 |

Mediante el análisis térmico diferencial y termogravimétrico simultáneo (ATD-TG) se examinaron las reacciones y transformaciones que ocurrieron durante el tratamiento térmico.

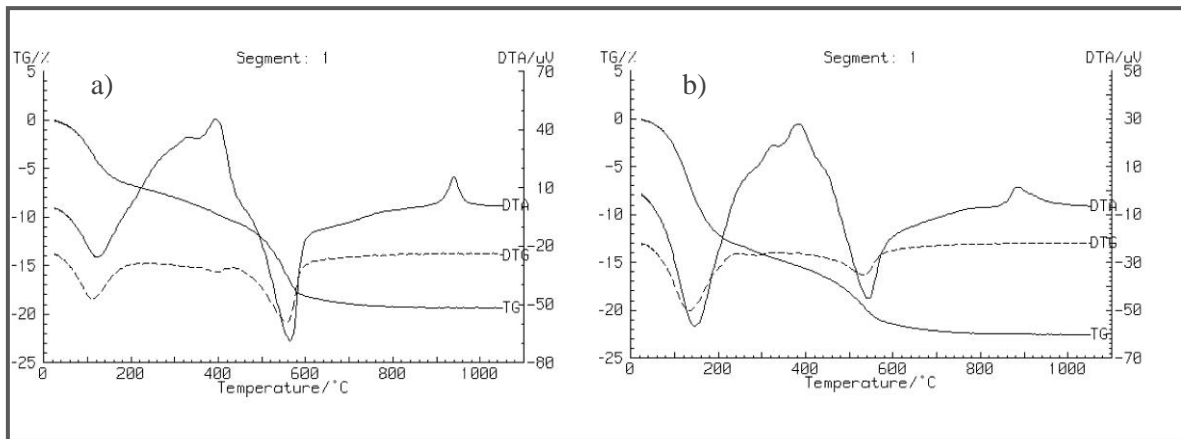


Figura 3.14: ATD-TG de los materiales arcillosos. a) Muestra SO (fracción <2 μm). b) Muestra SR5 (fracción <2 μm).

El diagrama ATD de SO (Figura 3.14-a) muestra un pico endotérmico a los 100° C que procede de la pérdida de agua absorbida; la deshidratación continuó hasta los 200° C, con la respectiva pérdida de peso, que corroboró el agua ligada a minerales arcillosos tales como esmectita y/o interestratificados. El segundo pico endotérmico y el exotérmico aparecen a 555 y 950° C, respectivamente. El efecto endotérmico observado en la zona de 550°C está asociado a la pérdida de agua de constitución de minerales arcillosos. La deshidroxilación de la caolinita ocurre aproximadamente a 560° C, dickita 700° C, vermiculita 800° C, esmectitas 600-800° C, illitas y micas 500-600° C y 800-900° C, respectivamente. Para la caolinita, la temperatura del pico exotérmico (980° C) puede estar afectada por el grado de desorden cristalino. Asimismo, las curvas pueden presentar variaciones que se deben al tamaño de partícula o incluso a cambios en la composición, como por ejemplo, en las cloritas como resultado del reemplazo del magnesio por el hierro. En SO se atribuyen a la presencia de caolinita desordenada.

El ATD de la muestra SR5 fue similar (Figura 3.14-b). Aunque en este caso la deshidroxilación de la esmectita-illita ocurrió en la zona entre 600 y 850° C con poca definición. El pico exotérmico a 889° C es de menor intensidad y se correlaciona con la menor proporción de caolinita determinada por DRX en la composición. En los diagramas se aprecia un pico endotérmico a 340° C con una pérdida gradual de peso en el TG, que fue asignado a la presencia de hidróxidos de hierro.

La distribución de tamaños de partícula de ambos materiales arcillosos fue similar (Figura 3.15). La fracción <2 μm constituye cerca del 70% del peso total de las muestras y la proporción de la fracción >10 es menor al 10%, debido a que se trata de materiales ricos en la fracción fina. Ambas muestras presentan elevada plasticidad (Cuadro 3.8.). El mayor índice de plasticidad de SR5 se explica por el alto porcentaje de argilominerales en la muestra total y por la composición fina que está mayoritariamente compuesta por esmectita y minerales expansibles.

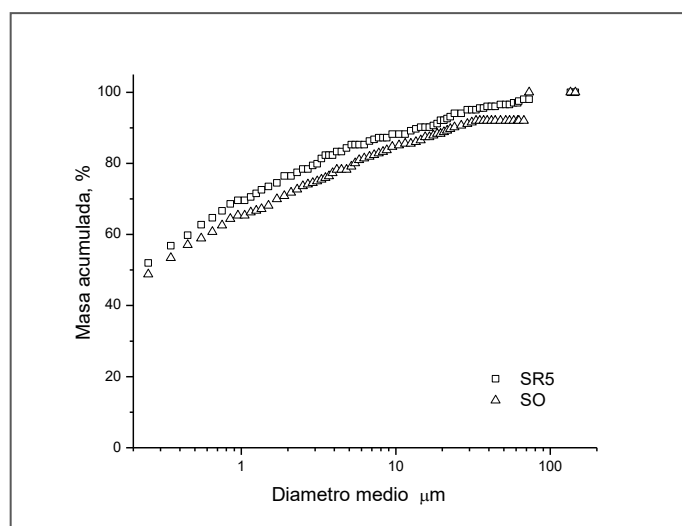


Figura 3.15: Distribución de tamaño de partículas de los materiales SR5 y SO.

La baja refractariedad de la muestra SR5, medida por CPE (Cuadro 3.8), se corresponde con la composición mineralógica, el elevado contenido de Fe_2O_3 (18,66%) y la alta relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. La mayor refractariedad de la arcilla SO se asocia a la presencia de caolinita y al menor contenido de óxidos fundentes (Fe_2O_3 , K_2O y Na_2O).

CUADRO 3.8: PROPIEDADES DE LOS MATERIALES ARCILLOSOS

| PROPIEDAD | SR5 | SO |
|-----------------------------|--------|--------|
| Distribución granulométrica | | |
| >74 μm | 2% | 8% |
| <2 μm | 76% | 70% |
| Índice de Plasticidad (IP) | 73,1% | 54,1% |
| CPE (°C) | 1262°C | 1470°C |

Situando los resultados de las distribuciones granulométricas en el diagrama ternario de Winkler (Figura 3.16), se observa que ambas materias primas arcillosas presentan granulometrías más finas que las usadas para fabricar cerámicos estructurales arcillosos. De igual manera, según la actualización de este diagrama (<2 μm, entre 2 y 10 μm y >10 μm) propuesta por *Dondi et al.* (1998), el contenido de la fracción arcilla (<2 μm) supera el de la composición granulométrica óptima para las formulaciones de cerámica roja utilizadas en la industria de Italia.

Cuando las materias primas empleadas contienen una gran cantidad de partículas arcillosas (<2 μm), mayor es la plasticidad pero también la cantidad de agua requerida en el proceso de conformado, lo cual puede ocasionar problemas en el secado y en la calcinación. Esto indica que estos materiales deberían ser mezclados con otros componentes para limitar los problemas de procesamiento por la elevada plasticidad como, por ejemplo, excesiva contracción y formación de fisuras.

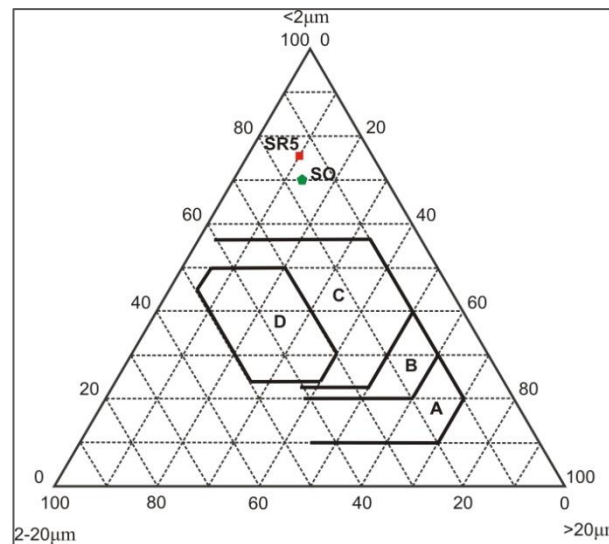


Figura 3.16: Clasificación de tamaño de partículas de SO y SR5 en el diagrama ternario de Winkler (1954). Referencias: (A) Ladrillos comunes, (B) ladrillos perforados verticalmente, (C) tejas y bloques ligeros, (D) bloques y ladrillos perforados.

Propiedades cerámicas de los materiales arcillosos SO y SR5 (sin adición de basalto) y a distintas temperaturas de calcinación

Se determinaron las características tecnológicas de las piezas conformadas con SO y SR5 - sin adición de basalto- en función de la temperatura de calcinación. Las propiedades cerámicas de los materiales arcillosos resultaron muy diferentes entre sí.

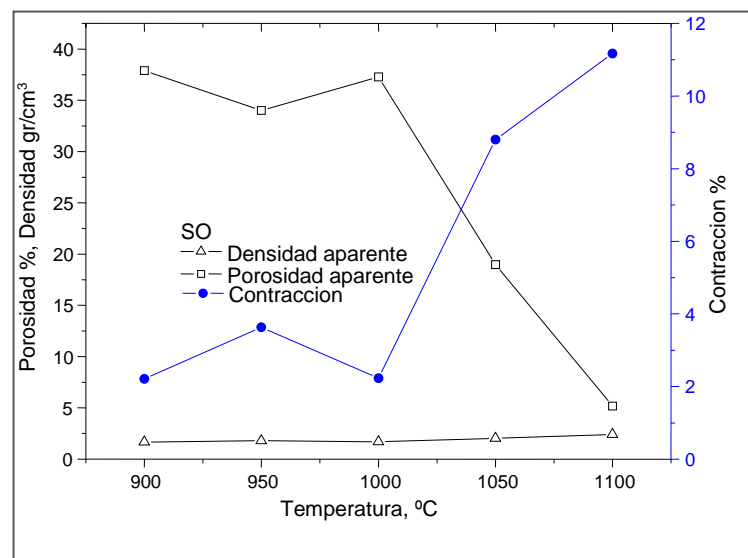


Figura 3.17: Propiedades cerámicas de las piezas producidas con SO. Porosidad aparente, densidad aparente y contracción en función de la temperatura de calcinación.

En la Figura 3.17 se muestra la variación de la densidad aparente, porosidad aparente y contracción lineal de las probetas preparadas con SO. Las piezas calcinadas presentaron elevada porosidad y baja contracción aproximadamente hasta 1000° C. Al aumentar la temperatura, se observó que la porosidad se redujo abruptamente (1100° C) y que la contracción lineal aumentó. Esto evidencia que la densificación -por vitrificación- ocurrió

a partir de los 1000° C, lo cual se relaciona con el valor CPE (1470° C) que indica la mayor refractariedad de esta muestra.

Para este tipo de arcilla la densificación ocurre por sinterización en presencia de fase líquida cuya formación se ve favorecida por la presencia de feldespatos y óxidos que actúan como fundentes. La fase líquida formada a alta temperatura rodea a las partículas sólidas y, por la tensión superficial, permite que las partículas se aproximen entre sí; reduciendo la porosidad y mejorando la densidad de empaquetamiento de la cerámica (Kingery 1975). Por ello se reduce la porosidad aparente o abierta y aumenta la contracción.

En el caso de los productos preparados con SR5, solo pudieron calcinarse hasta 900° C. A temperaturas <1000° C, tuvieron un importante aumento de la contracción con agrietamientos excesivos que provocaron la rotura de las piezas. Además se observó la presencia de un “corazón negro” que se relaciona con contenidos de hematita y atmósfera reductora en el interior de las piezas. Estos resultados concuerdan con la composición química de esta muestra (Cuadro 3.7) que presenta un mayor porcentaje de óxidos de hierro y alcalinos, principalmente K_2O y Na_2O , que en reacción con sílice y alúmina promueven la formación de la fase líquida que facilita la densificación. Consecuentemente para SR5 se estima una mayor formación de fase líquida a menor temperatura.

Efecto de la adición de basalto en las propiedades de los cerámicos obtenidos

Como ya se mencionó, los basaltos en diversas proporciones (20-80% en peso) se utilizaron como parte integrante de composiciones formuladas con los materiales arcillosos SO y SR5, con el fin de mejorar sus características y márgenes de aplicabilidad. Para ello, se estudió la evolución de las propiedades físicas, cerámicas y estructurales, con las variaciones de composición y temperatura, según lo ya descrito.

La incorporación de basalto modificó la distribución granulométrica de las diferentes formulaciones, tal como se muestra en las Figuras 3.18 y 3.19.

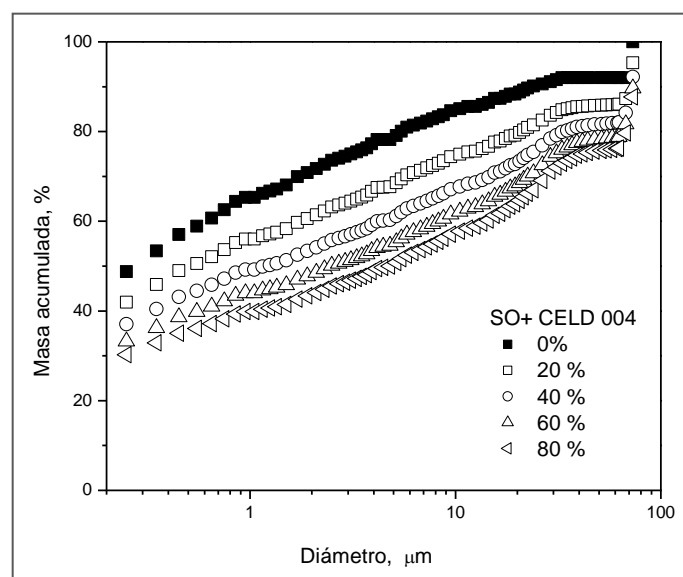


Figura 3.18: Curvas granulométricas de las formulaciones de SO con diferentes contenidos de CELD 004.

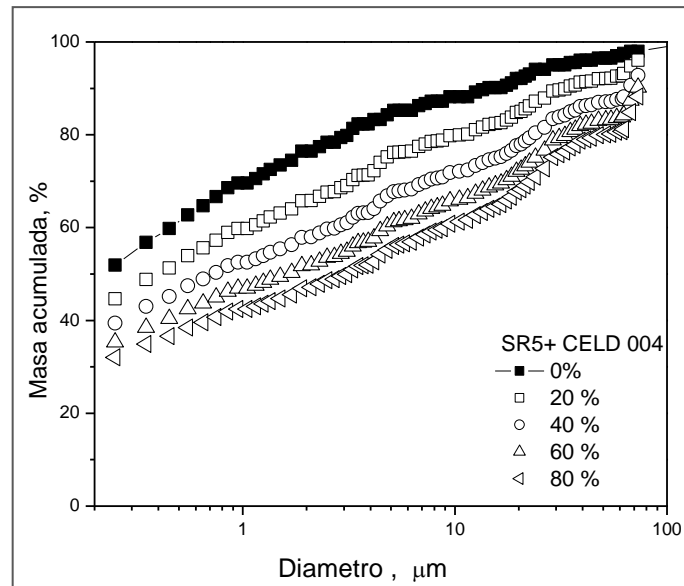


Figura 3.19: Curvas granulométricas de las formulaciones de SR5 con diferentes contenidos de CELD 004.

Con el aumento de la adición de basalto, las curvas granulométricas de las mezclas se acercan a una distribución bimodal y evidencian un aumento del tamaño promedio de partícula d_{50} y una reducción importante del contenido de la fracción $<2 \mu\text{m}$.

Para las formulaciones con SO y 20-80% de basalto, se observó que el d_{50} varió entre 0,7 y $7 \mu\text{m}$ y la fracción $<2 \mu\text{m}$ abarcó desde el 60 al 41%, respectivamente. A su vez la sustitución de SR5 por basalto entre 20 y 80% aumentó el d_{50} desde 0,35 a $3,2 \mu\text{m}$ y decreció el contenido de finos de 66% a 46%, respectivamente. Comparativamente, las composiciones con SR5 resultaron más finas que las obtenidas utilizando SO.

Efecto de la adición de basalto sobre las propiedades del producto seco

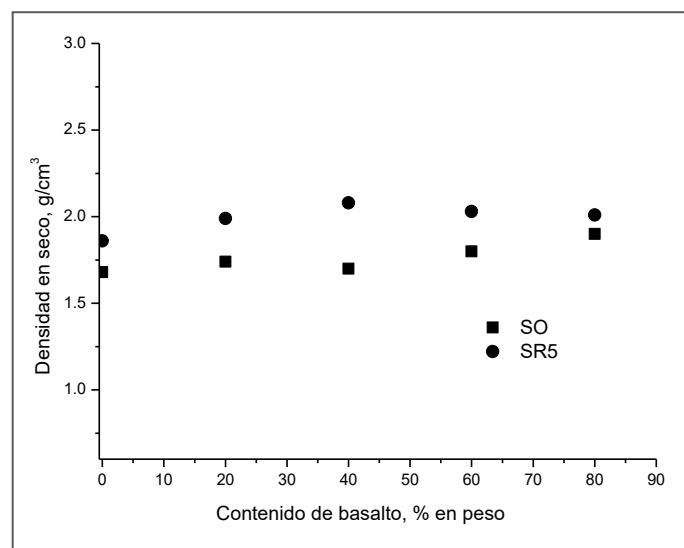


Figura 3.20: Densidad de los productos secos preparados con SO, SR5 y CELD 004.

La densidad de las piezas en seco producidas con SO (Figura 3.20) aumentó linealmente con el contenido del basalto CELD 004. En cambio, la densidad de las probetas procesadas

con SR5 mostró un débil incremento hasta un contenido del 40% de basalto, a partir del cual se redujo. En general, la densidad depende de la naturaleza y contenido de las especies minerales presentes en el producto seco y de la porosidad.

En la Figura 3.21 se muestra la densidad relativa DR (calculada como cociente entre la densidad de la probeta seca y la densidad teórica DT) de productos obtenidos con las diferentes composiciones de SR5 y los tres basaltos, observándose que las mezclas con los residuos RFT y RFA presentaron un comportamiento similar al determinado para CELD 004. La densidad relativa alcanza un valor máximo (mínima porosidad) con un 40% de basalto indicando un aumento de la densidad de empaquetamiento de partículas del producto seco, con respecto al del material arcilloso. Esto se asocia a un empaquetamiento de partículas más eficiente aportado por la distribución granulométrica bimodal.

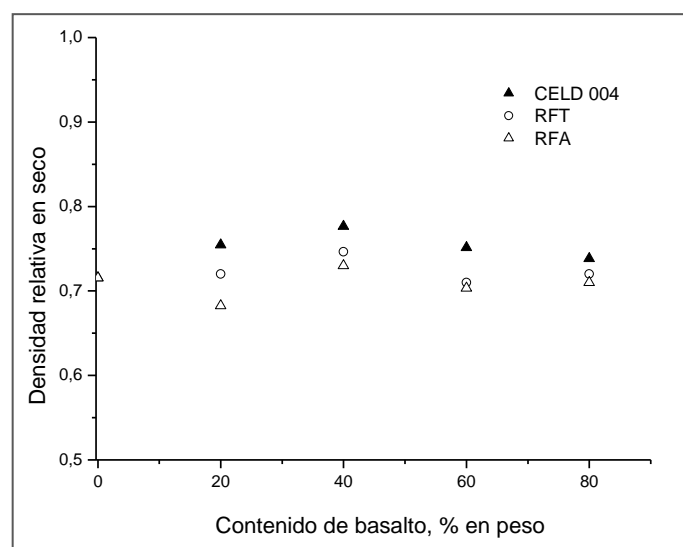


Figura 3.21: Densidad relativa de piezas secas con SR5 y diferentes contenidos de los basaltos CELD 004, RFT y RFA.

La contracción lineal por secado de los productos preparados con SO, SR5 y CELD 004 también mostró diferencias (Figura 3.22). En el primer caso, resultó variable entre 10 y 8,5%, mientras que en el segundo, se observaron contracciones en un rango de 14% (para 20% de basalto) hasta 10% (para adiciones de 80%). La mayor contracción de SR5 se relaciona con la presencia de minerales expansivos. La menor contracción para las composiciones con abundante basalto se explica por el cambio de la composición mineralógica (reducción del contenido de arcilla y minerales expansivos) y por la distribución granulométrica de las mezclas (menor contenido de finos, Figura 3.19). La Figura 3.22 muestra también la reducción en la contracción por secado (del 15 al 10%) con el aumento gradual de RFT hasta el 80%. Asimismo, se puede observar que la adición de RFA resultó menos beneficiosa, con valores del 14 al 13%. El menor efecto causado por RFA se asigna a la granulometría relativamente más fina de este residuo (Figura 3.10).

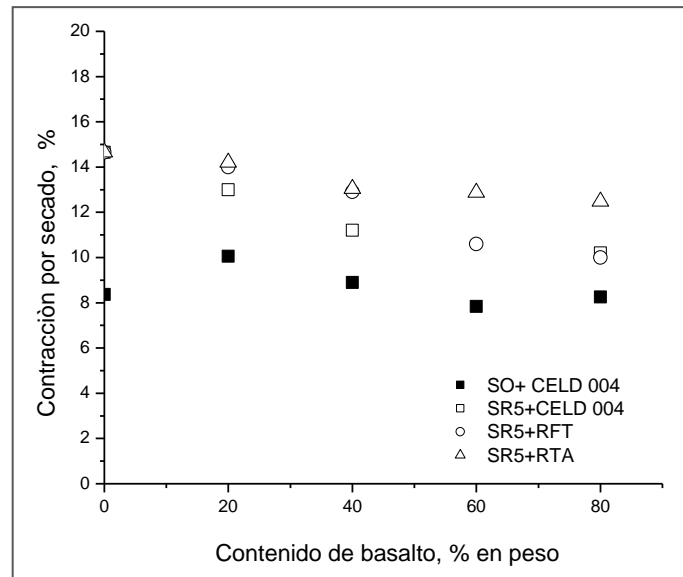


Figura 3.22: Contracción por secado de piezas con SO y SR5 para diferentes contenidos de CELD 004, RFT y RFA.

La resistencia mecánica de los diferentes productos secos se midió por el módulo de ruptura a la flexión MOR (Figura 3.23). Los valores del material producido con SR5 resultaron entre 4,5-5,5 MPa, siendo mayor que 3-3,5 MPa para SO. Para ambos materiales arcillosos se observó una tendencia a la reducción del MOR a partir del 40% de basalto adicionado, es decir al disminuir la proporción de arcilla en la mezcla. El MOR presentó un comportamiento similar al de la contracción por secado. Así se verificó que la pieza conformada con la arcilla más plástica presentó la mayor resistencia a la flexión en seco. No se observó una correlación clara entre un alto MOR y baja porosidad para una misma serie debido probablemente al error experimental en la medición del MOR.

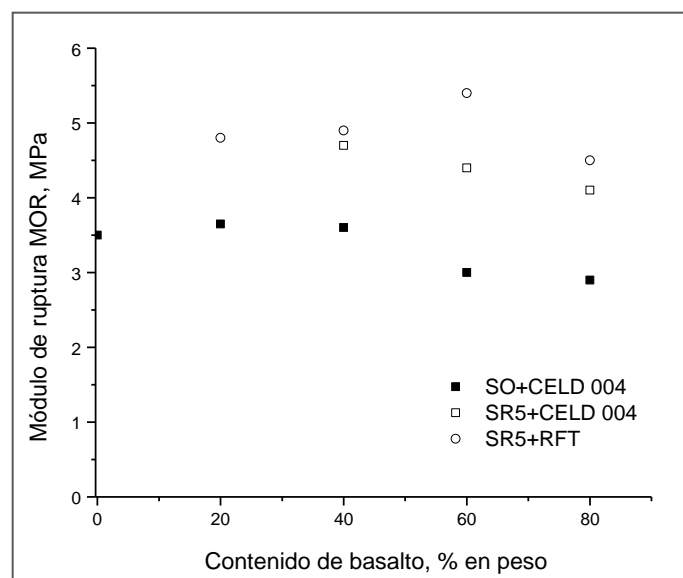


Figura 3.23: MOR vs. Contenido de basalto para mezclas con SO - CELD 004; SR5 - CELD 004 y SR5 -RFT.

Efecto de la adición de basalto y de la temperatura sobre las propiedades cerámicas

Formulación SO-CELD 004

Las características de las piezas cerámicas producidas con las diferentes composiciones de la mezcla SO-CELD 004, en función de las temperaturas de calcinación, se muestran en las Figuras 3.24, 3.25 y 3.26.

La contracción de las piezas aumentó con la temperatura (Figura 3.24). En las mezclas con baja proporción de basalto el aumento fue de <1% a 900° C hasta 9% a 1100° C. En tanto que las piezas preparadas con 80% de basalto mostraron un menor aumento de la contracción, que resultó entre 1 y 5% para 950 y 1100° C, respectivamente.

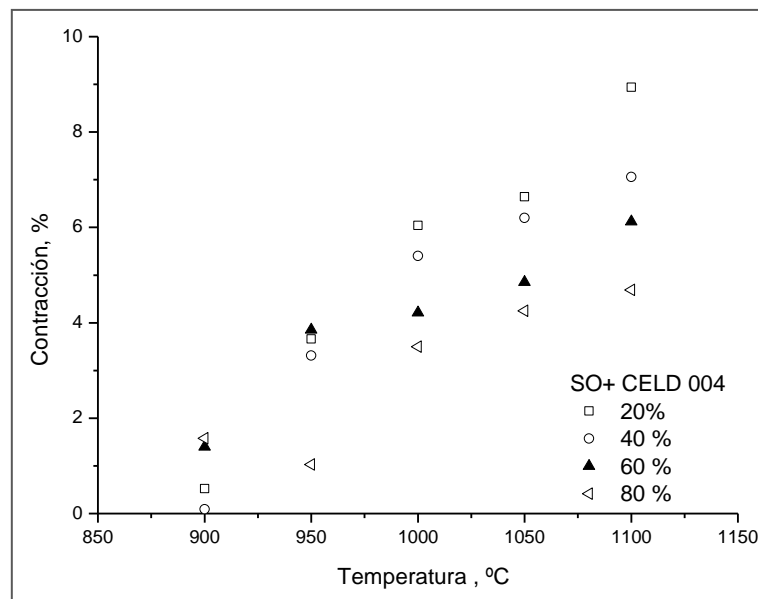


Figura 3.24: Contracción de las piezas con SO y diferentes contenidos de CELD 004 vs. Temperatura de sinterizado.

De la misma manera, la densidad aparente de las piezas con adiciones de entre 20 y 60% de basalto, aumentó con la temperatura hasta alcanzar un máximo a los 1050° C, manteniéndose aproximadamente constante para una mayor temperatura de tratamiento. Para la composición con 80% de basalto, la densidad aumentó casi linealmente hasta 1100°C.

La mayor densidad a bajas temperaturas de sinterizado correspondió a las piezas con las composiciones más ricas en basalto, mientras que a altas temperaturas fue similar (Figura 3.25). Estos cambios se explican por modificaciones en la porosidad y por las fases presentes en los productos sinterizados, las cuales dependen de la composición utilizada (naturaleza y contenido de ambos constituyentes de la mezcla) y del tratamiento térmico.

En cuanto a la porosidad aparente, la Figura 3.26 muestra su relación con la temperatura de calcinación para las diferentes composiciones de SO con CELD 004. Se observa que la reducción de la porosidad con el aumento de la temperatura dependió de la composición inicial. La porosidad de las piezas con 20% de basalto disminuyó significativamente desde

35% a 6% para 900 y 1100° C, respectivamente. Para contenidos de basalto entre 40 y 80% se encontró una reducción menor, desde 32 a 14%, para el mismo rango de temperaturas. De modo que la reducción de la porosidad con la temperatura para las composiciones más ricas en arcilla, fue relativamente más marcada que en el resto de las mezclas.

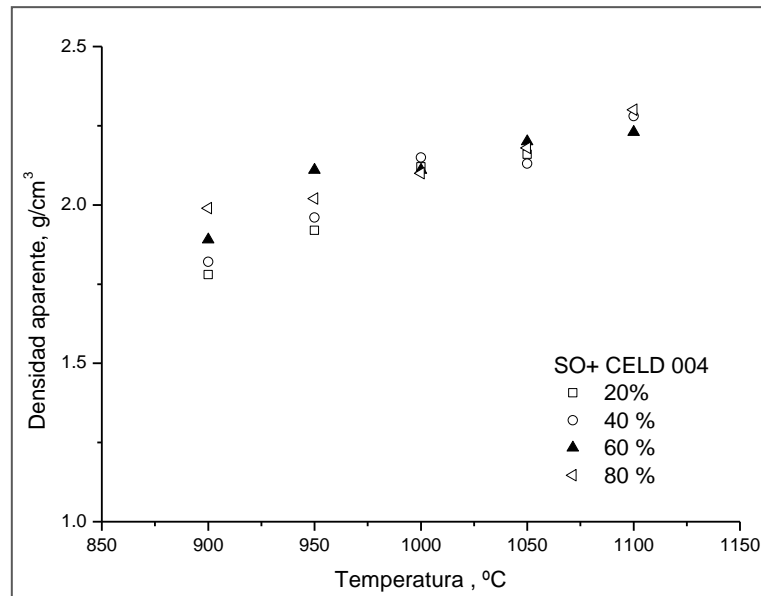


Figura 3.25. Densidad aparente de las piezas con SO y diferentes contenidos de CELD 004 vs. Temperatura de sinterizado.

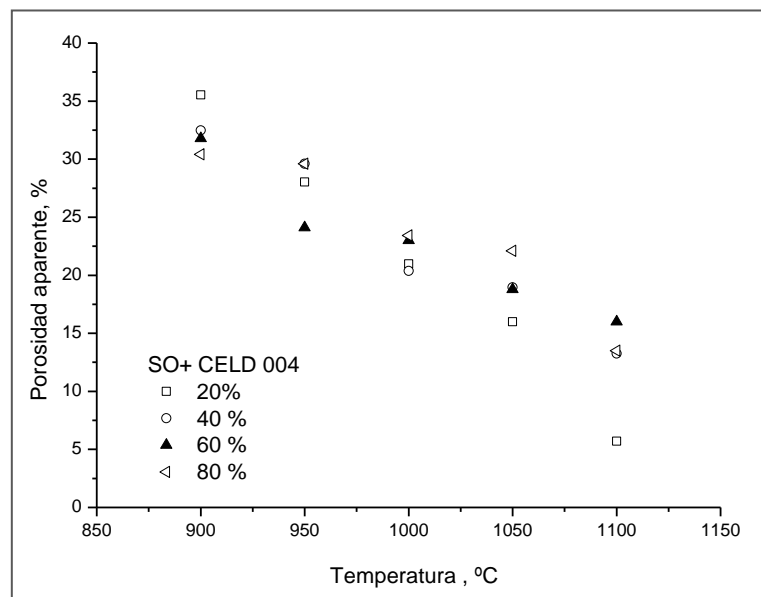


Figura 3.26: Porosidad aparente de las piezas con SO y diferentes contenidos de CELD 004 vs. Temperatura de sinterizado.

Se observó además que la menor densidad de las piezas calcinadas a 900° C, estuvo asociada a una porosidad elevada debido a que la sinterización está en su etapa inicial (mínima contracción). En tanto que, la mayor densidad y similar porosidad que correspondió a las piezas producidas con 80% de basalto, a diferentes temperaturas, se puede explicar por el abundante contenido de basalto que es el componente más denso en la mezcla.

Considerando que el grado de vitrificación de las piezas aumenta con una mayor formación de fase líquida a alta temperatura, entonces la reducción de la porosidad y por lo tanto, el aumento de la densidad se relaciona con el porcentaje de arcilla y con la temperatura de calcinación. Esto se verifica para la composición rica en arcilla que presentó la mínima porosidad y consecuentemente un aumento de la densidad a los 1100° C. Por lo tanto, con un bajo porcentaje del componente arcilloso en la mezcla, la formación de la fase líquida resultaría insuficiente para eliminar completamente el volumen de poros y cohesionar las partículas, manteniendo así una alta porosidad residual en los productos cerámicos. Teniendo en cuenta estos factores se puede explicar de manera similar la densidad de las piezas producidas a partir de formulaciones con un moderado contenido de basalto.

Formulación SR5-CELD 004

Las características de las piezas producidas con las diferentes composiciones de SR5 y CELD 004, en función de la temperatura, se muestran en la Figuras 3.27, 3.28 y 3.29.

La contracción, para adiciones entre 20 y 60% de basalto, tuvo un importante aumento desde 1-2% para 900° C (inicio del proceso de sinterización), hasta 6-7% para 950° C. A mayores temperaturas los valores permanecieron relativamente constantes. Para las formulaciones con 80% de basalto, la contracción aumentó gradualmente de 2% a partir de 950° C, hasta 4% a 1100° C.

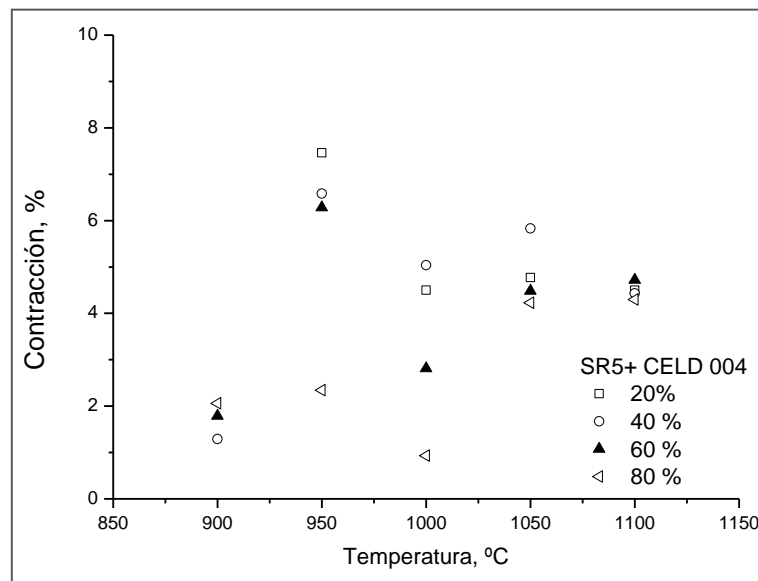


Figura 3.27: Contracción lineal de las piezas con SR5 y diferentes contenidos de CELD 004 vs. Temperatura de sinterizado.

Como en el caso de las mezclas con SO, se observó que la mayor contracción correspondió a las muestras más ricas en arcilla. Este resultado indicó que la adición de basalto produjo un efecto positivo para reducir la contracción excesiva que presentaron estas formulaciones.

Las piezas preparadas con la composición SR5 - 20 y 40% de basalto, exhibieron una densidad aparente relativamente alta a 950° C, coincidiendo con la máxima contracción. El aumento de la temperatura causó un efecto poco apreciable en esta propiedad, acorde con

el escaso cambio de la contracción. Esto estaría indicando que para las composiciones con bajo contenido de basalto la óptima vitrificación se alcanzó a los 950° C. Para las formulaciones con 60 y 80% de basalto, la densidad aumentó gradualmente con el tratamiento térmico hasta los 1100° C, donde presentó el mayor valor y comparativamente menor variación que en las demás composiciones. Similarmente a lo observado en las mezclas con SO, las formulaciones con mayor adición de basalto exhiben la mayor densificación a temperaturas más altas.

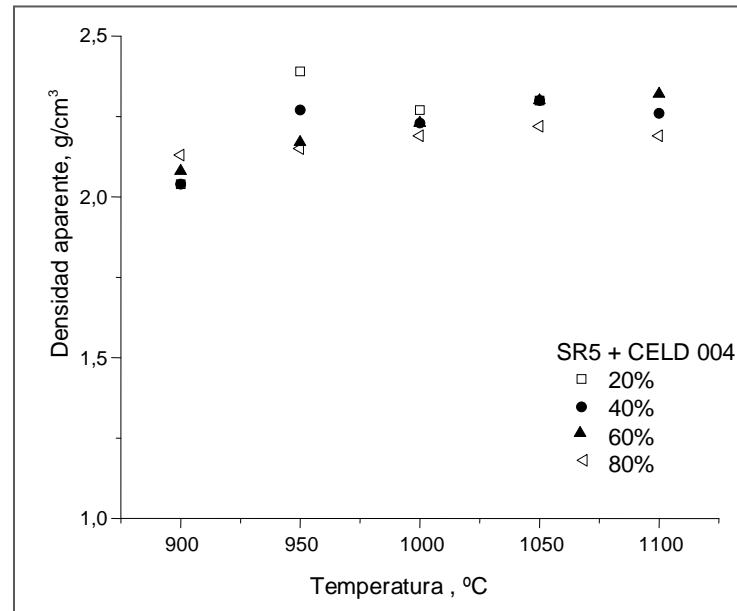


Figura 3.28: Densidad aparente de las piezas con SR5 y diferentes contenidos de CELD 004 vs. Temperaturas de sinterizado.

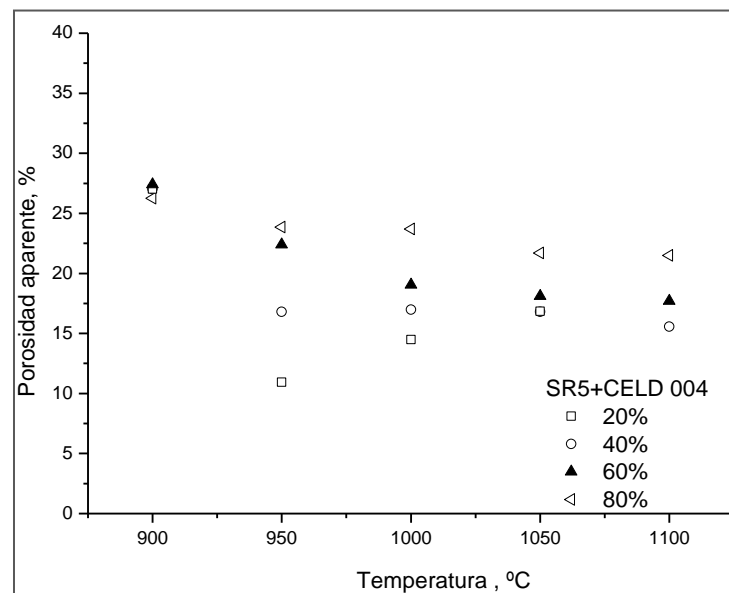


Figura 3.29: Porosidad aparente de las piezas con SR5 y diferentes contenidos de CELD 004 vs. Temperatura de sinterizado.

En cuanto a la porosidad, las piezas procesadas con SR5 y 20% de CELD 004, alcanzaron un valor de 28% a 900° C, el cual se redujo notablemente hasta 12% a 950° C. A mayor temperatura (entre 1000 y 1100° C), los valores de porosidad se aproximaron al 15%. Con

altos contenidos de basalto, la reducción de la porosidad fue menor (del 26 al 22%). Así conforme la adición de basalto aumenta, se requiere mayor temperatura para modificar la microestructura del compacto.

En ambos casos (SO y SR5 con CELD 004), se comprobó que la contracción y porosidad residual de las piezas obtenidas dependió básicamente de la composición de la mezcla y de la temperatura de sinterizado. La sustitución de arcilla por basalto produjo cambios en la distribución granulométrica de las dos formulaciones.

El contenido de basalto tiende a reducir significativamente la contracción de las piezas, puesto que resulta inerte a temperaturas relativamente bajas actuando como material de relleno. A su vez, la menor proporción de arcilla -con el aumento en la adición de basalto- retarda el proceso de densificación y resultan materiales más porosos.

Fases cristalinas presentes en las piezas calcinadas a diferentes temperaturas, con y sin adición de basalto

Numerosos estudios indican que las transformaciones que ocurren durante el tratamiento térmico -formación de nuevos compuestos y vitrificación- se relacionan con la composición mineralógica de las arcillas y otros constituyentes de las pastas. Asimismo, las diferencias químicas -en especial las sustituciones isomórficas en los minerales arcillosos-, la naturaleza y contenido de los minerales accesorios, las impurezas, así como también, las condiciones del tratamiento térmico, ejercen una influencia importante en la composición de las fases, cambios de fases o reacciones que tienen lugar durante la sinterización.

En este estudio, las fases presentes en las piezas producidas con SO y SR5, como único componente y calcinadas a diferentes temperaturas, fueron examinadas por DRX. Las transformaciones observadas indican una relación directa con la mineralogía de las materias primas.

Las piezas producidas con SO a 900-1000° C (Figura 3.30) están compuestas por una fase amorfa (por la descomposición térmica de las arcillas) y fases cristalinas como cuarzo, compuestos de titanio (rutilo, ilmenita) y escaso feldespato. A partir de 1050° C, se observó la aparición de espinela y mullita, ambas producto de la reacción entre caolinita y sílice. El desarrollo de mullita y cristobalita aumentó significativamente por calcinación a 1100° C, acompañadas de escasa hercinita y de cuarzo y titano magnetita como fases secundarias remanentes.

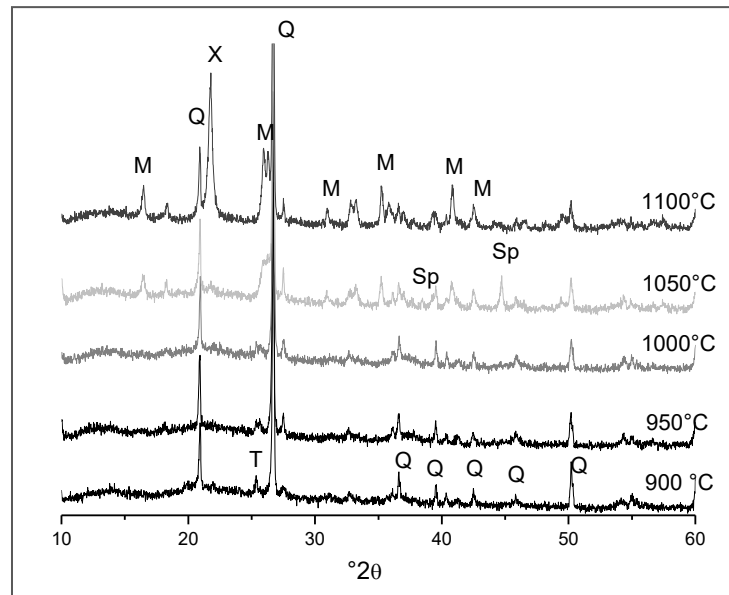


Figura 3.30: DRX de las piezas con SO (sin adición de basalto) sinterizadas a distintas temperaturas. Referencias: Q= cuarzo, X= cristobalita, T= compuestos de titanio, M= mullita Sp= espinela.

Las piezas con SR5 (Figura 3.31), calcinadas a 950 y 1000° C, están constituidas de fase amorfa, junto con cuarzo, hematita y hercinita como componentes minoritarios. Estas últimas fases se forman por la transformación térmica o de sustitución de óxidos e hidróxidos de Fe y por la reacción entre la alúmina de la arcilla y Fe, respectivamente. A 1050° C la composición fue similar con mayor formación de cristobalita y la consecuente reducción del pico de cuarzo. La calcinación a 1100° C favoreció el desarrollo de cristobalita, mullita y espinela (Fe_2MgO_4). El aumento de estas fases contribuyó a la reducción de la hercinita y cuarzo, con importante contenido de hematita.

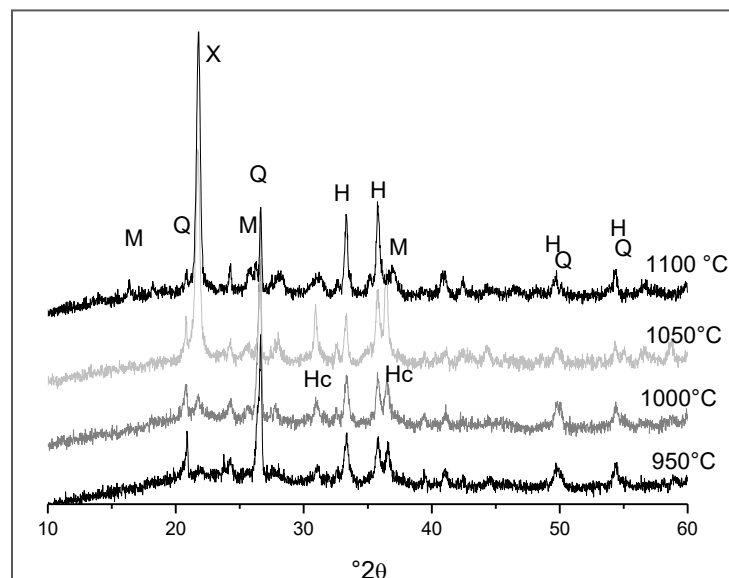


Figura 3.31: DRX de las piezas con SR5 (sin adición de basalto) sinterizadas a distintas temperaturas. Referencias: Q= cuarzo, X= cristobalita, H= hematita, Hc= hercinita, M= mullita.

Las piezas con SR5 y la adición de basalto, calcinadas a 900 y 1000° C, presentaron una composición similar a SR5, mostrando además plagioclasa y augita, dadas por la

composición de la roca. Para 20% de basalto (Figura 3.32) se aprecia -a partir de 1000°C- la reducción del contenido de cuarzo, plagioclasa y augita junto con el aumento de la formación de cristobalita y mullita. En este caso, el desarrollo de mullita se vio favorecido ya que ocurrió a partir de 1050° C, en tanto que para SR5 (Figura 3.31) se detectó a 1100°C. Probablemente la presencia de plagioclasa, Fe y otras impurezas aceleró las transformaciones.

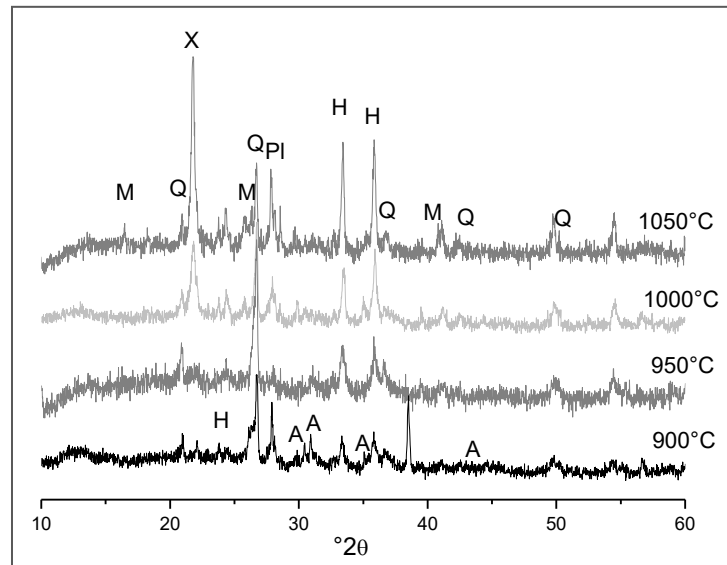


Figura 3.32: DRX de piezas con SR5 y 20% de basalto CELD 004 a distintas temperaturas. A 1050° C se distingue el pico de mullita. Referencias: Q= cuarzo, X= cristobalita, M= mullita, Pl= plagioclasa, A= augita H= hematita.

Con altos contenidos de basalto es notable el aumento de plagioclasa y augita (Figura 3.33) y el desarrollo de cristobalita y de hematita, en tanto que la formación de espinela y hercinita resultó inhibida debido al insuficiente contenido de arcilla.

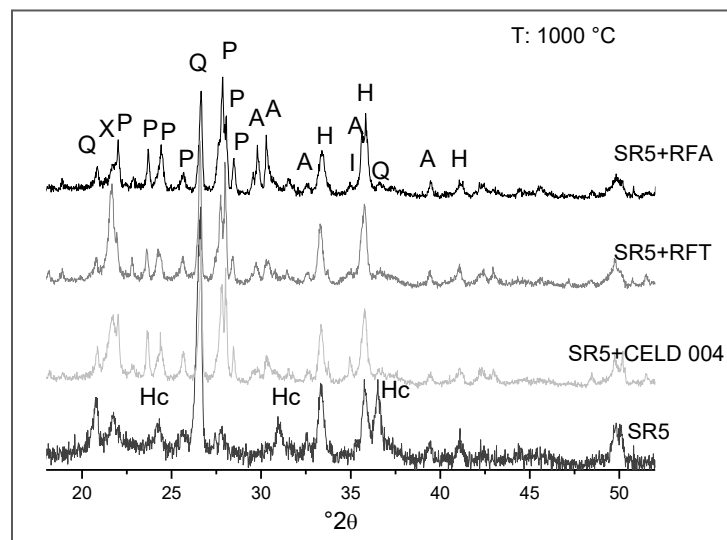


Figura 3.33: DRX de SR5 (sin adición de basalto) y con 60% de basalto (CELD 004, RFT y RFA) sinterizadas a 1000° C. Referencias.: Q= cuarzo, X= cristobalita, P= plagioclasa, A= augita, H= hematita, Hc= hercinita.

Variación del MOR de las piezas calcinadas con las diferentes adiciones de basalto

La variación de la resistencia mecánica de los diferentes cerámicos con ambas mezclas de SO y SR5 con CELD 004, fue medida a través del módulo de ruptura por flexión MOR (Figuras 3.34 y 3.35). En general se observó que el MOR aumentó con la temperatura de calcinación. Además el MOR de las piezas calcinadas a baja temperatura mostró poca variación con la composición, indicando un control dado por la elevada porosidad.

En particular, el MOR de las piezas con SO tratadas a 1100° C fue elevado, lo que se relaciona con la reducción de la porosidad (aumento del grado de densificación) y la significativa formación de mullita. No obstante, el aumento en la proporción de basalto de 20 al 80%, redujo el valor de 40 MPa a 35 MPa, respectivamente. Ello se asocia con el menor desarrollo de mullita, al disminuir la proporción de arcilla, dado que la porosidad fue similar.

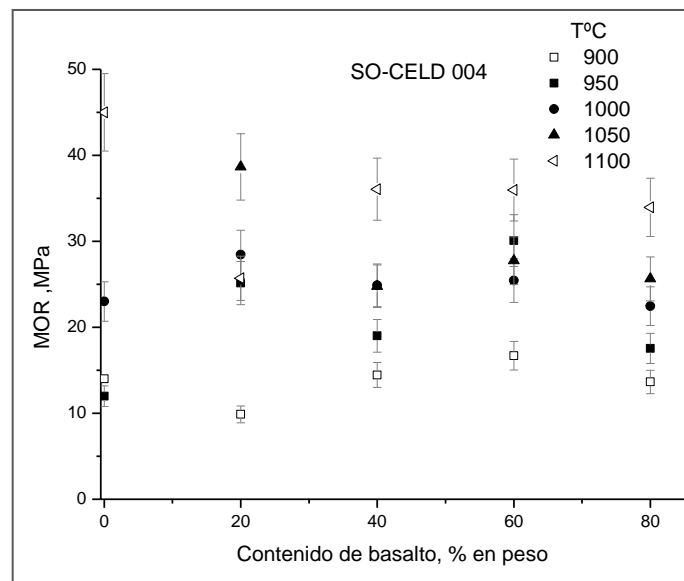


Figura 3.34: MOR de las piezas con SO y diferentes contenidos de CELD 004 vs. Temperatura de sinterizado.

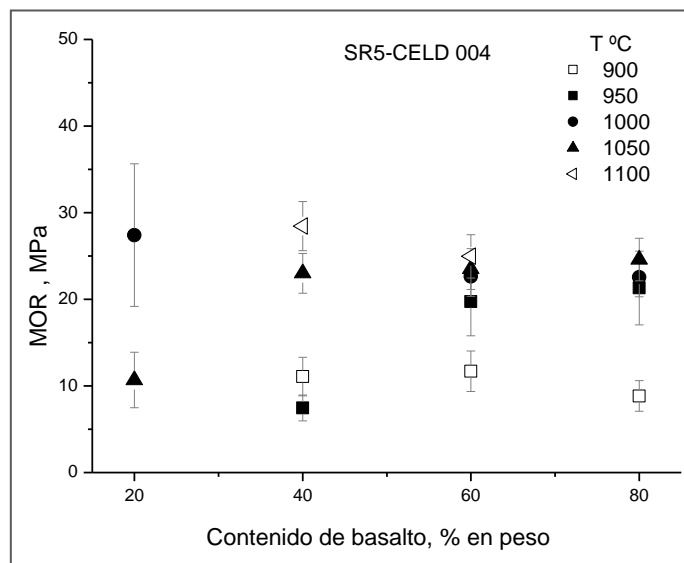


Figura 3.35: MOR de las piezas con SR5 y diferentes contenidos de CELD 004 vs. Temperatura de sinterizado.

En cuanto a los cerámicos elaborados con SR5, los materiales con 20% de basalto, así como los calcinados a 900° C, presentaron valores de MOR bajo, cercanos a 10 MPa. Estos cerámicos se caracterizan por una alta porosidad y presencia de defectos. A partir de los 950° C, la resistencia mecánica mejoró, resultando un MOR variable entre 20-25 MPa, debido a que estas temperaturas intensifican la formación de la fase vítrea y ello conduce a la reducción de la porosidad. A 950-1000° C, aún las piezas preparadas con 40-60% de basalto, mostraron valores satisfactorios de MOR de 20-25 MPa. En estos casos ocurrió un leve aumento de la porosidad, relacionado con la disminución de la vitrificación, que se ve compensado por la reacción de los compuestos derivados de la descomposición de la arcilla y las fases secundarias.

Efecto de la adición de residuos finos recuperados de una planta vial sobre las propiedades cerámicas

Formulación Residuos basálticos (RFT y RFA) – SO

El efecto de la temperatura de sinterizado sobre las propiedades cerámicas de las piezas producidas con las diferentes composiciones de SO y los residuos RFT, se muestran en las Figuras 3.36 y 3.37.

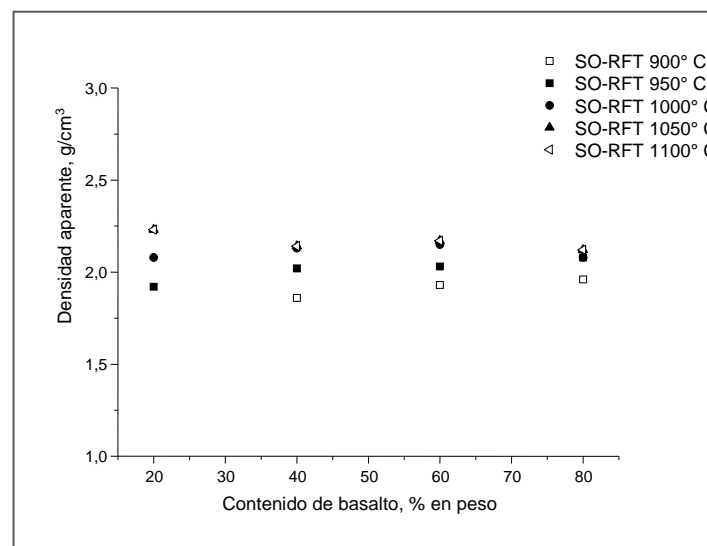


Figura 3.36: Densidad aparente de las piezas con SO y RFT sinterizadas a diferentes temperaturas vs. Contenido de basalto.

En la Figura 3.36 se puede observar que la densidad aparente de las piezas cerámicas se incrementó con la temperatura de sinterizado. El aumento fue relativamente mayor para los productos con 40-60% de basalto, puesto que cambió de 1,8 g/cm³ a 900° C hasta 2,1 g/cm³ a 1000°C. En tanto que las piezas preparadas con 80% de basalto, presentaron la menor variación con la temperatura, con valores cercanos a 2 g/cm³. Las composiciones ricas en arcilla siguieron la tendencia opuesta. La densidad y la contracción aumentaron con la temperatura debido a la importante reducción de la porosidad aparente lograda con el desarrollo de la vitrificación (Figura 3.37).

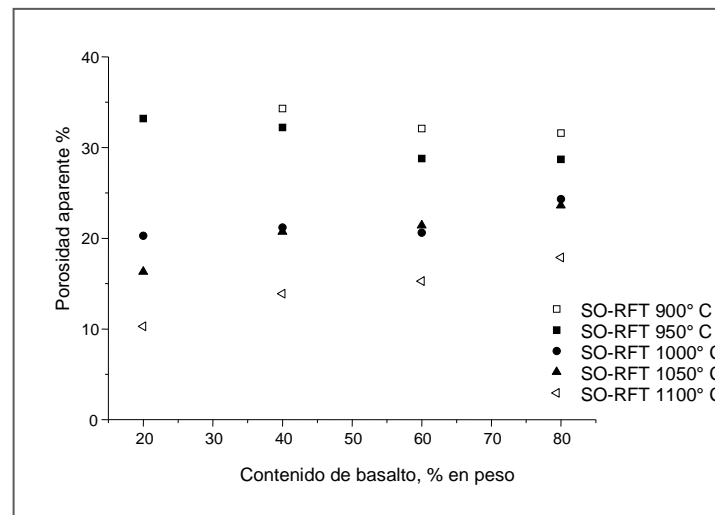


Figura 3.37: Porosidad aparente o abierta de las piezas con SO y RFT sinterizadas a diferentes temperaturas vs. Contenido de basalto.

A bajas temperaturas, la densidad de las piezas aumentó básicamente por la adición de basalto en la mezcla, debido a que el basalto es más denso que los otros componentes. Las piezas preparadas con elevados porcentajes de basalto resultaron comparativamente más porosas, lo cual compensó, en cierta forma, el aumento de la densidad esperado por las fases presentes. Por ello, la porosidad aparente de las piezas sinterizadas a 900° C fue elevada (31-35%) y resultó independiente del contenido de basalto. La reducción de la porosidad con el aumento de la temperatura fue de hasta 10% a 1100° C, para mezclas con 20% de basalto y, del 18% para mezclas con 80%. Ello es consistente con la tendencia observada con el tratamiento térmico, siendo mayor la sinterización en las mezclas ricas en arcilla. Así, las piezas con 20% de basalto tuvieron una contracción de 1% a 900° C, aumentando a 7% a 1100° C, debido al alto contenido de arcilla. En cambio, para 80% de basalto, la contracción sólo alcanzó valores de 0,5 a 4-5%, lo cual corrobora el efecto beneficioso logrado con la reducción del componente arcilloso en la composición.

Formulación Residuos basálticos (RFT y RFA) – SR5

Las características de las piezas preparadas con SR5 y distintas proporciones de RFT y RFA variaron con las temperaturas de sinterizado. Las determinaciones realizadas indican un comportamiento similar a lo observado para la mezcla SR5-CELD 004.

La densidad aparente de los cerámicos con RFT sinterizados a distintas temperaturas resultó en un rango de 2,1 y 2,3 g/cm³, con una variación más marcada entre 950 y 1000° C (Figura 3.38). La contracción varió entre 2 y 5%, correspondiendo los menores valores a altos contenidos de basalto. A su vez, la porosidad aparente de las piezas con proporciones bajas de basalto, disminuyó de 25 a 18% para 950 y 1100° C, respectivamente (Figura 3.39). Para el mismo rango de temperaturas, las piezas con 80% de basalto resultaron más porosas (28-25%). Esto indica que el aumento de la temperatura resultó poco efectivo en las formulaciones con altos porcentajes de basalto.

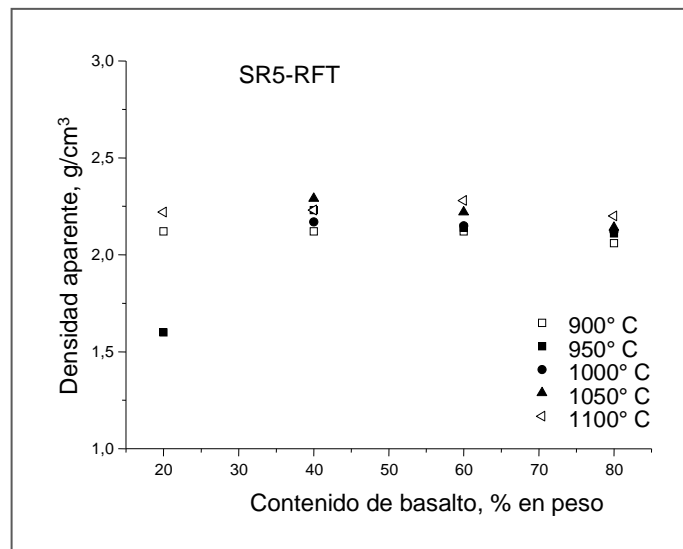


Figura 3.38: Densidad aparente de las piezas cerámicas con SR5 y RFT sinterizadas a distintas temperaturas vs. Contenido de basalto.

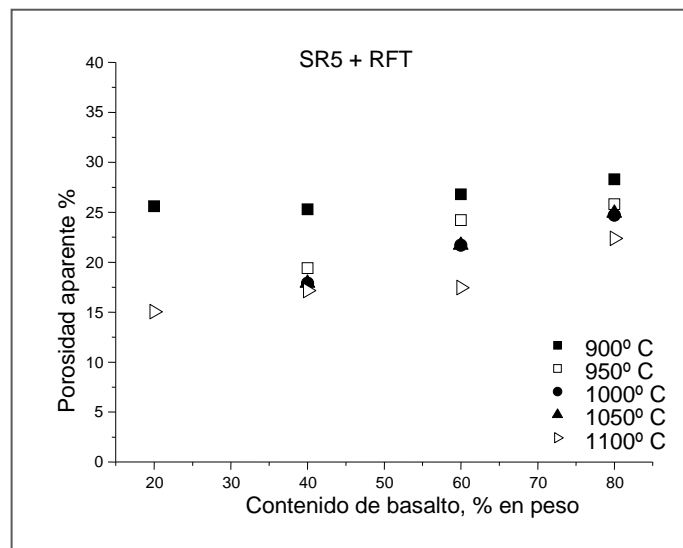


Figura 3.39: Porosidad aparente de las piezas con SR5 y RFT sinterizadas a diferentes temperaturas vs. Contenido de basalto.

La mezcla SR5 y RFA originó productos con características similares (Figuras 3.40 y 3.41). Las piezas con menor contenido de basalto resultaron más densas por calcinación a 950° C, en coincidencia con una mayor contracción (8%) y una mayor reducción de la porosidad (15%). Entre 1050 y 1100° C se observó una leve variación de estas características. El aumento de adición de basalto a 60% provocó un incremento de la porosidad hasta 22% a 950 °C, mejorando la contracción que solo fue del 3-4%. Las piezas fabricadas con 80% de residuo y calcinadas a 900 °C, mostraron una porosidad elevada, cercana al 28%, lo cual se atribuye a la insuficiente vitrificación. Para esta composición, sinterizada a 950° C, se observó la menor reducción de la porosidad que llegó hasta 22%, mientras que el incremento de la temperatura hasta 1100° C tuvo un efecto poco apreciable.

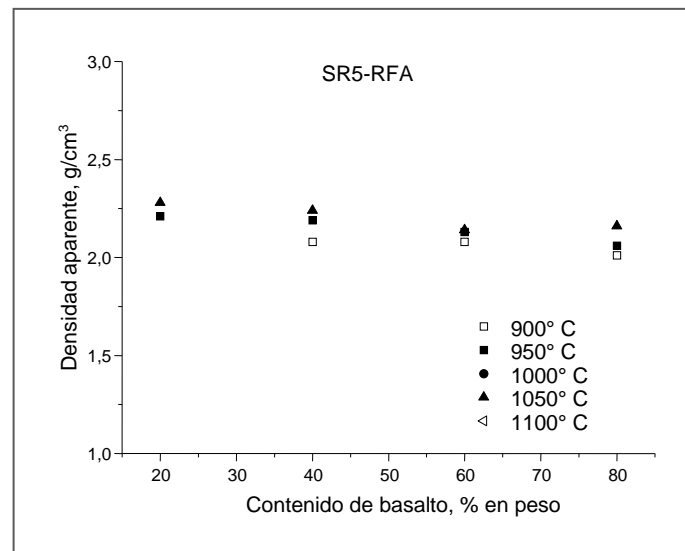


Figura 3.40: Densidad aparente de las piezas con SR5 y RFA sinterizadas a diferentes temperaturas vs. Contenido de basalto.

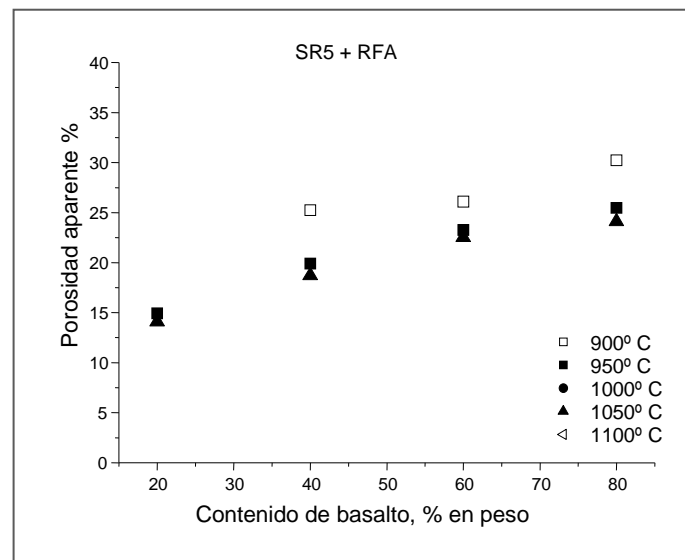


Figura3.41: Porosidad aparente de cerámicos con SR5 y RFA sinterizados a diferentes temperaturas vs. Contenido de basalto.

El MOR de las composiciones con bajo contenido de basalto sinterizado a partir de 900° C fue mayor debido a la reducción de la porosidad. El efecto de la temperatura en el MOR fue levemente menor en los materiales ricos en basalto, debido al aumento relativo de la porosidad y/o menor cohesión entre partículas por insuficiente vitrificación. Figuras 3.42 y 3.43.

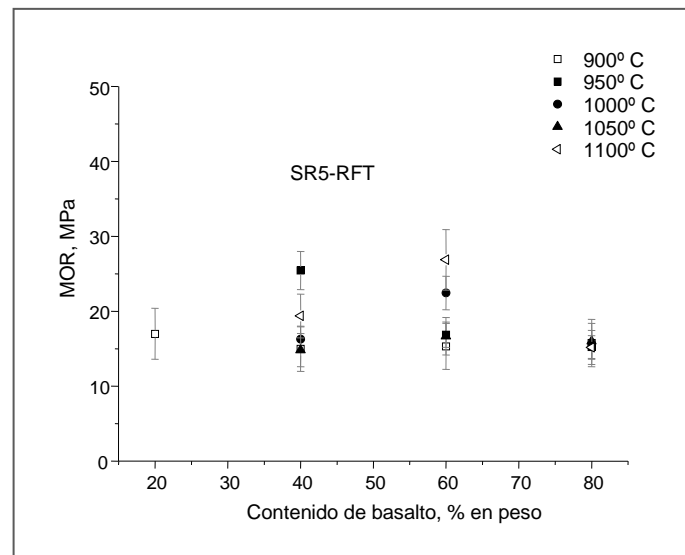


Figura 3.42: MOR de las piezas con SR5 y RFT sinterizadas a diferentes temperaturas vs. Contenido de basalto.

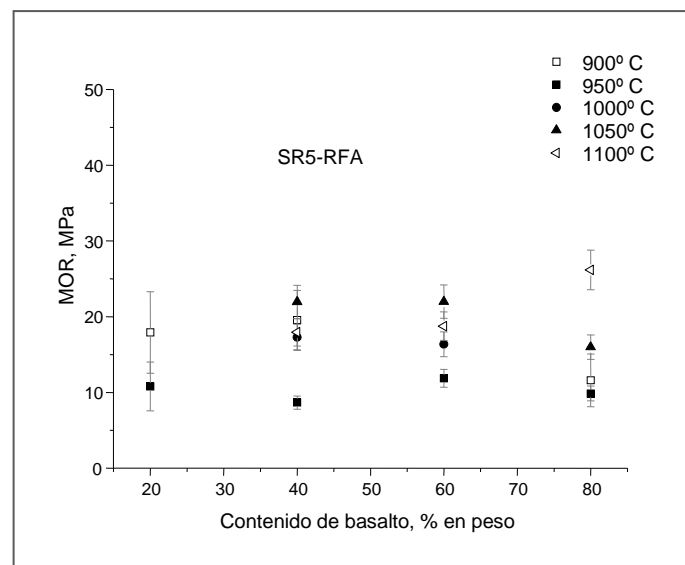


Figura 3.43: MOR de las piezas con SR5 y RFA sinterizadas a diferentes temperaturas vs. Contenido de basalto.

Estudios de aptitud para uso ornamental

Materiales y métodos

Se utilizaron dos basaltos de la FSG procedentes de las localidades de Eldorado y Oberá (Figura 3.44). La caracterización básica de estas rocas se realizó por microscopía óptica a través de la descripción de cortes delgados, mientras que la caracterización tecnológica incluyó ensayos físicos, mecánicos y de alterabilidad realizados en el Centro de Investigación en Geología Aplicada (CIGA) del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). Las pruebas de compresión y flexión se efectuaron según normas ASTM C170-94 y ASTM C880/85, respectivamente; el ensayo de desgaste se realizó utilizando el método Dorry con un recorrido de pista de 1.000 m. Para la determinación de la resistencia a los agentes químicos se tomó como referencia la norma IRAM 11836 por no contar con un procedimiento específico para rocas. Los ensayos de ataque con sulfato de sodio y con etilén glicol fueron realizados en el Laboratorio de Investigaciones Viales y Ensayos Tecnológicos de la Dirección Provincial de Vialidad (Misiones), según normas IRAM 1525 e IRAM 1519, respectivamente.



Figura 3.44: Procedencia de los basaltos de la FSG utilizados para la caracterización básica para uso ornamental. Una de las muestras fue tomada en la zona de estudio (sobre la RN 12, Eldorado) y la otra fue extraída de una cantera situada en cercanías de la ciudad de Oberá (RN 14).

Resultados y discusión

Petrografía

El basalto Eldorado es una variedad de color gris, densa, de grano fino y con textura microporfírica dada por el mayor tamaño de los minerales opacos en relación con la pasta. La mineralogía primaria consiste en un agregado de plagioclasas (labradorita) con abundantes inclusiones; piroxenos (augita y pigeonita); óxidos de hierro (magnetita) e ilmenita, estos últimos como accesorios (Figura 3.45). La roca contiene minerales secundarios (arcillas) y rasgos de procesos de devitrificación.

El basalto Oberá es de color gris verdoso con venillas pardo rojizas, estructura densa, grano grueso (macrocrystalino) y textura intergranular. La mineralogía identificada está compuesta por tablillas de plagioclasa entre las cuales se disponen piroxenos (augita) y minerales opacos. Se observaron componentes de color verde (distintas tonalidades), dispuestos intergranularmente en espacios con formas irregulares, muchas veces con aspecto fibroso o escamoso y rasgos de devitrificación en mayor proporción que en la muestra de Eldorado (Figura 3.46).

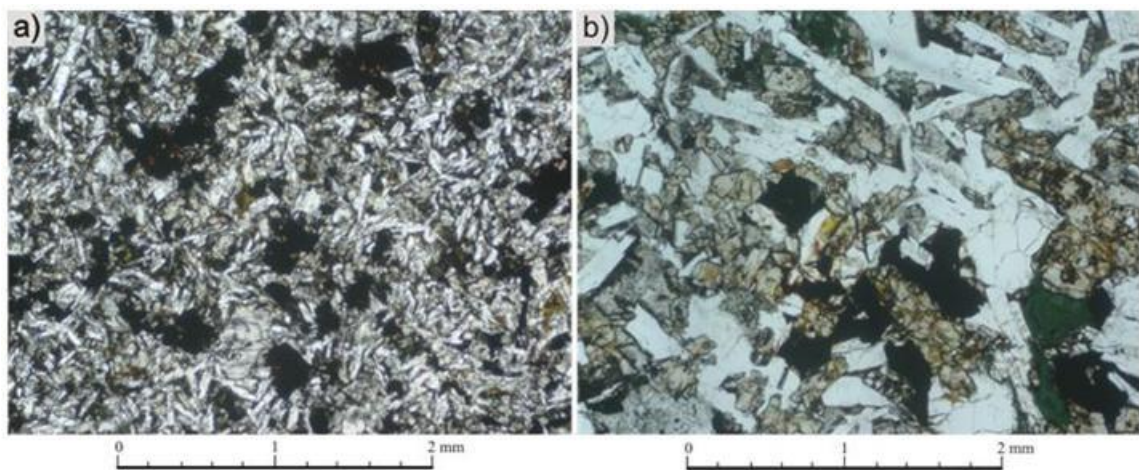


Figura 3.45: Tamaño de grano y texturas de los basaltos. a) Sección delgada sin analizador del basalto Eldorado. La roca presenta grano fino y textura microporfírica. b) Sección delgada sin analizador del basalto Oberá. El tamaño de grano es más grande que Eldorado y la textura es intergranular.

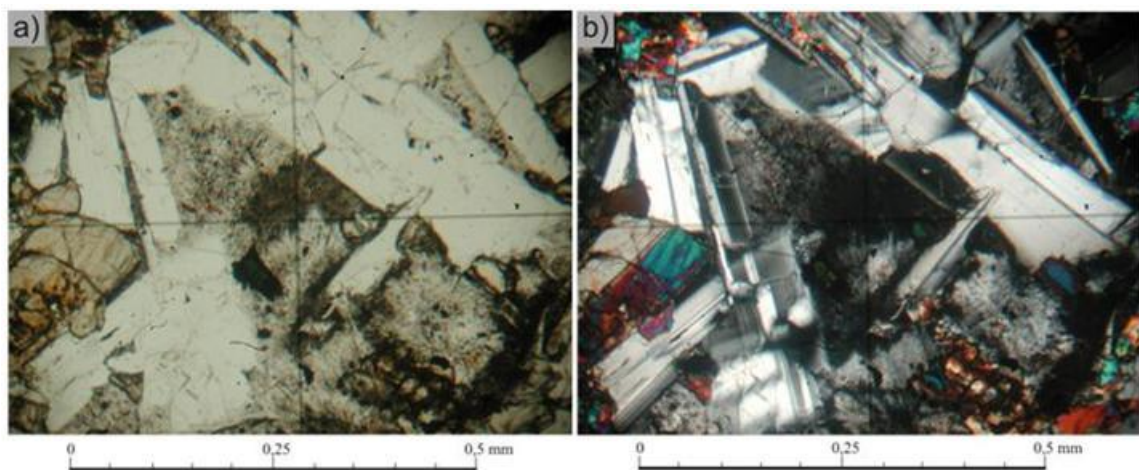


Figura 3.46: Parches vítreos observados en el basalto Oberá (centro del corte). a) Sección delgada sin analizador. b) Sección delgada con analizador.

Ensayos Tecnológicos

El uso ornamental demanda que los materiales posean ciertas características tecnológicas que permitan su aplicación y garanticen su durabilidad. Los ensayos necesarios para evaluar las aptitudes ornamentales de una roca se definen de acuerdo al uso pretendido. El Cuadro 3.9 muestra los ensayos considerados prioritarios en relación con diferentes aplicaciones, según Frascá (2002).

| CUADRO 3.9: ENSAYOS PRIORITARIOS SEGÚN LA FUNCIÓN DEL REVESTIMIENTO. SEGÚN FRASCÁ (2002). | | | | | | |
|---|----|-------|------|---------|------|----------|
| FUNCIÓN REVESTIMIENTO | DE | PISOS | | PAREDES | | FACHADAS |
| | | Ext. | Int. | Ext. | Int. | |
| TIPO DE ROCA | | X | X | X | X | X |
| ABSORCIÓN | | X | X | X | X | X |
| RESISTENCIA A LA ABRASIÓN | | X | X | | | |
| RESISTENCIA A LA FLEXIÓN | | X | X | | | X |
| RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN | | X | | X | X | X |
| DILATACIÓN TÉRMICA | | X | X | X | X | X |
| ACABADO SUPERFICIAL | | X | X | | | X |
| ALTERABILIDAD | | X | X | | | X |

Según estos criterios, además del tipo de roca, la absorción, seguida por la dilatación térmica, resistencia a la flexión, resistencia a la compresión y alterabilidad, son las propiedades más significativas en relación con las posibilidades de uso. En el caso de los pisos y fachadas, a estas características, se suman requisitos de resistencia a la abrasión y acabado superficial, respectivamente.

Con respecto a los valores de estas propiedades, a modo referencia, se pueden citar los rangos consignados para algunas rocas comercializadas en el país, según el Catálogo Piedras ornamentales Argentina 2000 (De Maio *et al.* 2000). Así por ejemplo, dentro de las rocas graníticas, la conocida variedad Sierra Chica (Olavarría), tiene datos de absorción de 0,08-0,18%; resistencia a la flexión de 8,3-12,0 MPa; resistencia a la compresión de 120,9-161,1 MPa y resistencia a la abrasión de 0,58-0,70 mm x 1000 m. En otro extremo, en el campo de las volcánicas ornamentales, se pueden citar los valores dados para algunas variedades de pórfidos (producidos en las provincias patagónicas), que, según el tipo, presentan rangos de absorción de 0,25 a 2,19%; resistencia a la flexión de 8,9 a 23,9 MPa; resistencia a la compresión de 98,8 MPa y resistencia a la abrasión de 0,51 a 1,44 mm x 1000 m.

Para empezar a indagar sobre la aptitud ornamental de algunos basaltos de la FSG (Eldorado y Oberá), se ensayaron propiedades físicas (densidad relativa, absorción y porosidad abierta); propiedades mecánicas (resistencia a la flexión, compresión y abrasión) y de resistencia a la alteración (resistencia a los agentes químicos), a los fines de considerar los principales requisitos citados para los distintos usos. Los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 3.10.

Las propiedades físicas no muestran mayores diferencias. Las mecánicas, en cambio, son notablemente más favorables para el basalto Eldorado, lo cual se relaciona con la textura y

grado de alteración que presenta Oberá. Si bien, ambas rocas tuvieron una respuesta similar de resistencia a los agentes químicos, la durabilidad de la muestra Oberá, a diferencia de Eldorado, no pudo ser confirmada por falta del ensayo específico para descartar procesos de alteración vinculados con arcillas expansivas.

| CUADRO 3.10: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS A LOS BASALTOS ELDORADO Y OBERÁ. | | |
|---|---|---|
| TIPO DE ENSAYO | BASALTO ELDORADO | BASALTO OBERÁ |
| PROPIEDADES FÍSICAS | | |
| DENSIDAD RELATIVA (gr/cm ³) | 2,93 | 2,85 |
| ABSORCIÓN (%) | 0,64 | 0,69 |
| POROSIDAD ABIERTA (%) | 1,87 | 1,95 |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | | |
| RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa) | 151,98 | 91,75 |
| RESISTENCIA A LA FLEXIÓN (Mpa) | 26,24 | 13,04 |
| RESISTENCIA A LA ABRASIÓN (mm x 1000 m) | 1,93 | 2,84 |
| DURABILIDAD | | |
| RESITENCIA A LOS AGENTES QUÍMICOS | Sin cambios visuales en la superficie expuesta a los agentes químicos empleados, por lo que se considera que la roca es resistente a los mencionados agentes. | Sin cambios visuales en la superficie expuesta a los agentes químicos empleados, por lo que se considera que la roca es resistente a los mencionados agentes. |
| Solución de ácido clorhídrico 3% | | |
| Solución de ácido clorhídrico 100 g/l | | |
| Solución de hidróxido de sodio 30 g/l | | |
| ATAQUE CON SULFATO DE SODIO (%) | 5,3 | s/dato |
| ATAQUE CON ETILÉN GLICOL (%) | 0 | s/dato |

Asimismo, para conocer las posibilidades de acabado superficial, se realizaron algunas pruebas de pulido manual y mecánico, que revelaron las superficies y colores que se muestran en la Figura 3.47.

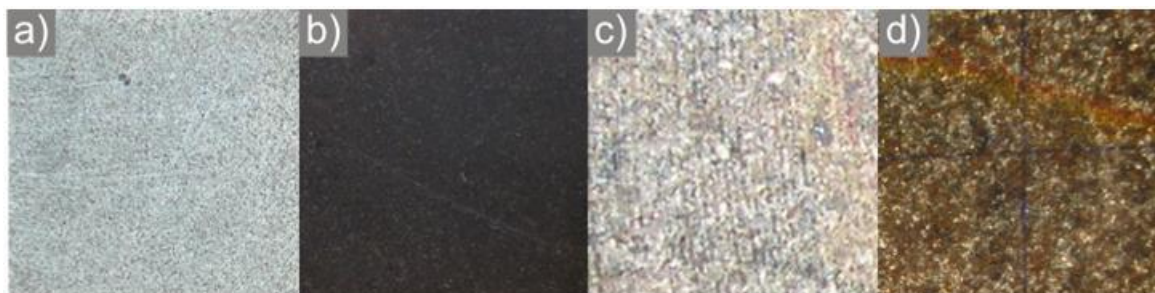


Figura 3.47: Superficies naturales y pulidas de los basaltos estudiados. a-b) Basalto Eldorado. c-d) Basalto Oberá.

Finalmente para ubicar los valores obtenidos en relación con los publicados para otras variedades ornamentales de origen volcánico y con características estéticas similares a los basaltos estudiados; en el Cuadro 3.11 se comparan las características tecnológicas de las muestras de Eldorado y Oberá, con el Pórfido Colum y el producto italiano comercializado como *Basaltina*. En el primer caso, se trata de una basandesita patagónica de textura porfírica y de color gris, mientras que el otro corresponde a una roca volcánica, también de color gris, ampliamente utilizada en la construcción de calzadas y revestimientos con diferentes acabados superficiales (rústico, pulido con y sin lustre, flameado, arenado, y otros).

CUADRO 3.11: COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DE LOS BASALTOS ESTUDIADOS CON VARIEDADES COMERCIALES DE ROCAS VOLCÁNICAS ORNAMENTALES.

| TIPO DE ENSAYO | BASALTO ELDORADO | BASALTO OBERÁ | PÓRFIDO COLUM | BASALTINA |
|--|---------------------|------------------|------------------|-----------|
| DENSIDAD RELATIVA (gr/cm ³) | 2,93 | 2,85 | 2,34 | 2,24 |
| ABSORCIÓN (%) | 0,64 | 0,69 | 2,19 | s/d |
| POROSIDAD ABIERTA (%) | 1,87 | 1,95 | 3,67 | s/d |
| RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa) | 151,98 | 91,75 | 98,8 | 82,45 |
| RESISTENCIA A LA FLEXIÓN (Mpa) | 26,24 | 13,04 | 8,9 | 13,80 |
| RESISTENCIA A LA ABRASIÓN (mm x 1000 m) | 1,93 | 2,84 | 1,44 | 2,30 |

Los valores de las rocas ornamentales comerciales fueron tomados del Catálogo Piedras Ornamentales Argentinas 2000 (De Maio *et al.* 2000) y del Catálogo comercial de BASALTINA S.R.L.

CAPÍTULO 4

Caracterización Ambiental del Área de Estudio

CAPÍTULO 4

Caracterización Ambiental del Área de Estudio

Introducción

En Misiones la minería del basalto es indispensable para el desarrollo de todo tipo de obras de infraestructura. De acuerdo a datos proporcionados por la Dirección General de Geología y Minería de la provincia, el número de establecimientos habilitados actualmente (2016) es de aproximadamente 30. No obstante, es posible que exista un subregistro de los mismos debido a casos de explotaciones no inscriptas.

Desde el punto de vista ambiental, la apertura de nuevas canteras para el aprovechamiento de basaltos o el funcionamiento de las existentes, requiere de la consideración y descripción de las condiciones ambientales de los sitios de implantación de los establecimientos mineros, así como también de los potenciales impactos y correspondientes medidas de protección ligadas a estas actividades. El marco legal para realizar este tipo de análisis está dado por la Ley Nacional de Protección Ambiental para la Actividad Minera N° 24.585 (Código de Minería), vigente en todo el territorio nacional desde 1995. Esta ley establece, entre otros, la necesidad de realizar Informes de Impacto Ambiental cuyos contenidos y alcances están fijados en una normativa complementaria, de acuerdo a la etapa y envergadura de los proyectos.

Más allá de los requisitos legales, el impacto ambiental de la explotación del basalto a nivel provincial, por el momento, ha sido escasamente tratado. Se pueden mencionar en este sentido, trabajos que revisan la cuestión de los pasivos ambientales mineros en Misiones (Páez Campos y Portaneri 2011); contribuciones sobre el aprovechamiento de los residuos basálticos finos, generados en plantas de trituración y fabricación de hormigón (Ciccioli et al. 2013a y Ciccioli et al. 2013b); así como también, algunas experiencias relacionadas con la recuperación de áreas degradadas debido al abandono de canteras, mencionadas en el trabajo de Páez Campos y Portaneri (2011).

La importancia de este recurso en la provincia y su potencial expansión a nivel regional, en estrecha relación con la evolución del sector de la construcción y el desarrollo de nuevas posibilidades de transporte (fluvial y ferroviario), torna imprescindible considerar -dentro del marco normativo e institucional- las condiciones socio-ambientales del contexto territorial en el que se plantea la explotación de estas rocas, así como también, avanzar en el estudio de usos alternativos (capítulo 3 de este trabajo), a los fines de promover un aprovechamiento integral y acorde a las demandas actuales de sustentabilidad.

Por ello se incluyó este capítulo en el que se presenta una caracterización ambiental a nivel provincial y local (zona de tesis) y una descripción general de los impactos ambientales de las explotaciones y procesos productivos, derivados de los usos actuales de las rocas

basálticas. La caracterización ambiental se completa con un análisis de las restricciones o limitantes identificadas para la minería del basalto en la zona de estudio.

Características ambientales a nivel provincial y del área de estudio

Misiones tiene una superficie de 29.801 km² y una población de 1.101.593 habitantes (IPEC 2015). Después de Tucumán, es la segunda provincia más pequeña del país y la cuarta en densidad poblacional (37 hab./km²). Administrativamente está dividida en 17 departamentos y 75 municipios. La zona de estudio (645 km²) se encuentra en el Departamento Eldorado (1960 km²), abarca principalmente al municipio homónimo y contiene a la tercera ciudad (Eldorado) más poblada de la provincia (IPEC 2015).

Clima

El clima de Misiones es subtropical sin estación seca o subtropical húmedo. Según la clasificación de Köppen modificada, corresponde al tipo Mesotermal húmedo (Templado húmedo), el cual se identifica como Cfw (h). Las temperaturas medias anuales superan los 20° C en la mayor parte de la provincia, mientras que las precipitaciones tienen valores por encima de los 1600 mm anuales. Los vientos predominantes son del nordeste, sudeste y del este. La Figura 4.1 muestra las temperaturas y precipitaciones medias *normales* que corresponden a Misiones, según los registros del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para el período 1981-2010. La Figura 4.1 incluye también datos estadísticos de la Estación Meteorológica Iguazú del SMN, situada 100 km al norte de la zona de estudio, donde se puede observar que las temperaturas máximas medias se ubican entre los 20° y los 32° C, y que las mínimas lo hacen entre los 10° y 20° C. Los registros para esta zona muestran que las estaciones con mayor cantidad de precipitaciones, para el período 1961-1990, fueron la primavera y el otoño. Para el mismo lapso se contabilizaron entre 7 y 11 días (por mes) con lluvias mayores o iguales a 0,1 mm y valores de humedad relativa en un rango de 73 y 87%. Los registros del viento indican que las velocidades medias se encuentran entre los 6,3 y 9,2 km/h. Por sus características climáticas, Misiones está expuesta a la ocurrencia de fenómenos meteorológicos severos (lluvias intensas con riesgo de inundaciones, fuertes tormentas con importante actividad eléctrica, granizo, eventos de elevada temperatura, entre otros). Así, por ejemplo, la zona de estudio ha sido afectada en las últimas décadas por inundaciones del río Paraná y también por el desborde de varios arroyos que repetidamente ocasionan inconvenientes a la población. Las altas temperaturas y las elevadas precipitaciones de esta región, junto con otros factores, crean además, situaciones ambientales favorables para la proliferación de enfermedades transmitidas por el agua o por los insectos (fiebre amarilla, dengue, zika, chikungunya, leishmaniasis cutánea y visceral, entre otras). Los operativos realizados en Eldorado, a partir de una re-emergencia de fiebre amarilla selvática que afectó principalmente a la zona norte de la provincia (2008-2009), y los casos reportados por dengue, especialmente desde el 2009 en adelante, son un ejemplo de los riesgos sanitarios a los que está expuesta esta zona, cuya vigilancia, prevención y control, en muchos casos se ve dificultada por su situación fronteriza.

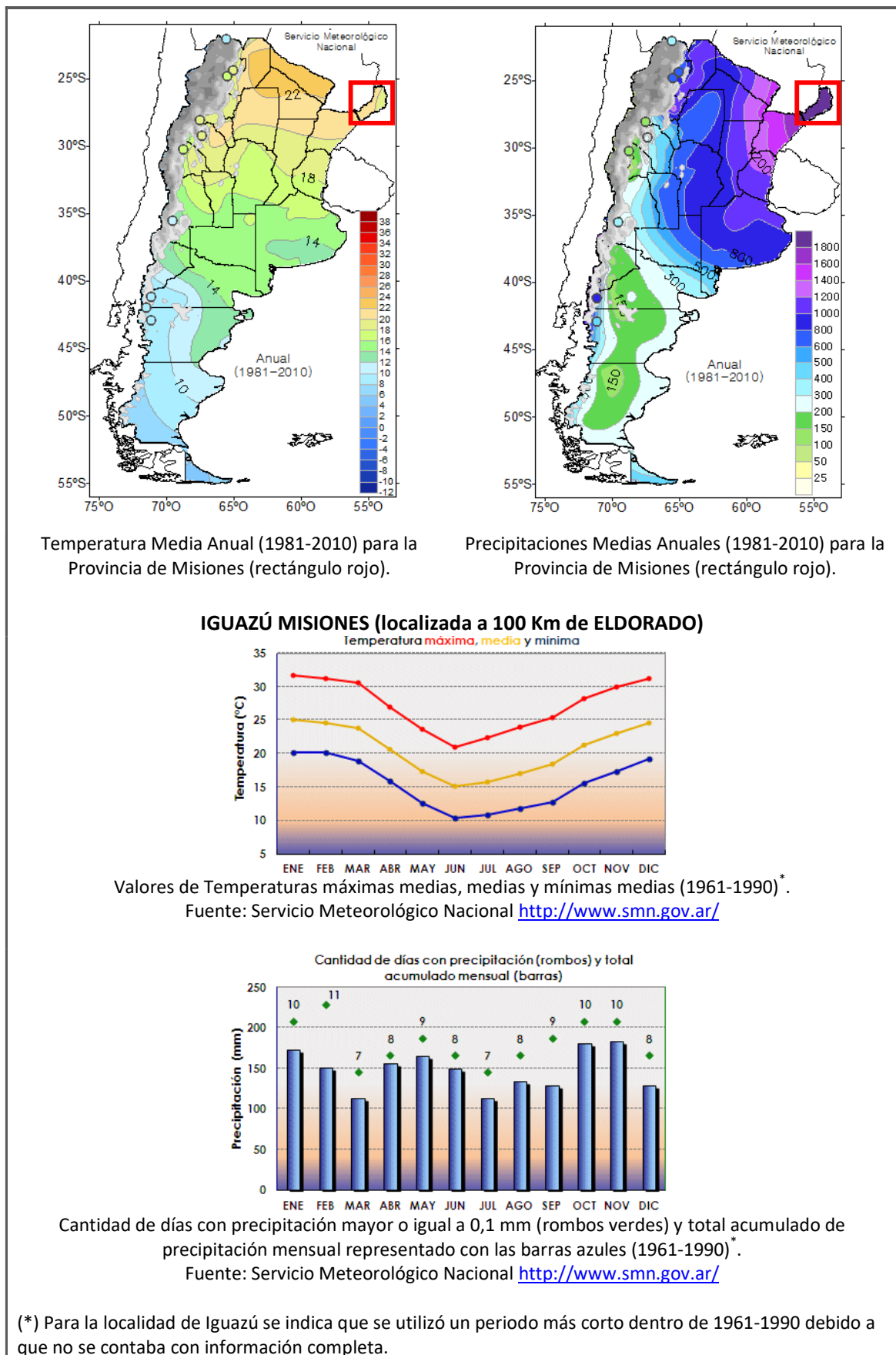


Figura 4.1: Información climática de la Provincia de Misiones y de la Estación Meteorológica Iguazú del SMN (ubicada a 100 km del área de estudio). Fuente Servicio Meteorológico Nacional <http://www.smn.gov.ar/>

Relieve

El relieve de Misiones está conformado por una meseta basáltica antigua (Cretácico inferior), cuyo modelado dio como resultado una topografía escalonada, producida por la acción de procesos morfogenéticos que actuaron durante el Terciario y el Cuaternario.

Popolizio (1972) explica las características de este relieve a través de una evolución geomorfológica ligada a oscilaciones climáticas, entre períodos más secos y más húmedos que el actual, ocurridas a partir del Terciario y especialmente en el Cuaternario. Este autor diferencia las formas producidas bajo condiciones húmedas y bajo condiciones secas (períodos biostásicos) señalando, no obstante, que los procesos de modelado más enérgicos (pediplanación, entallamiento fluvial y otros) habrían tenido lugar durante los períodos de transición entre ambas condiciones (períodos rexistásicos). Identifica varias superficies de erosión que denomina, según la nomenclatura de trabajos brasileños, como Pd₃, Pd₂, Pd₁, P₂, y P₁, de la más antigua a la más reciente.

Iriondo y Kröling (2008) citan estudios realizados sobre paisajes de meseta en Sudáfrica y Brasil (por ejemplo, King 1956, Ab'Saber 1956 y 1970, Bigarella *et al.* 1965), según los cuales, los procesos morfogenéticos más importantes que tienen lugar en estos casos son el retroceso de escarpas y la formación de pediplanos que producen superficies subhorizontales en cada ciclo. Estos autores, siguiendo a King (1956), mencionan para Misiones tres niveles denominados Superficies Sul-Americana, Velhas y Paraguaçu. La primera sería la meseta basáltica original, de la cual sólo quedarían relictos ubicados en el noreste de la provincia, en la zona de Bernardo de Irigoyen, donde se dan las mayores alturas (cota máxima 843 msnm). La superficie Velhas sería un nivel más bajo que estaría ocupando un tercio de Misiones, con alturas entre los 300 y 400 msnm (la media provincial es de 471,5 msnm). Asociadas con este nivel existen colinas bajas del tipo “media naranja”, suavemente onduladas y con perfil convexo, atribuidas a un modelado fluvial antiguo (Figura 4.2). Esta superficie correspondería en el centro sur de Misiones a la divisoria de aguas entre las cuencas de los ríos Paraná y Uruguay (Sierra de Misiones o Central y Sierra del Imán). Con respecto al ciclo Paraguaçu, es el nivel más bajo y el más reciente, y se le atribuye la formación de profundos valles e importantes regresiones de escarpa que habrían afectado a la Superficie Velhas. De acuerdo con Iriondo y Kröling (2008), esta superficie corresponde, en el sur de Misiones, a la Peniplanicie de Apóstoles, ubicada por debajo de los 200 msnm y vinculada con la red fluvial actual.

Según las regiones naturales definidas para la provincia de Misiones en el Atlas de Suelos de la República Argentina (SAGyP, INTA, Proyecto PNUD ARG 85/019 – Área Edafológica 1989), la zona de Eldorado se encuentra principalmente en la región denominada *Pediplano Parcialmente Disectado*. No obstante, el borde oriental del área correspondería, en menor medida, a la región designada como *Relieve fuertemente ondulado o colinado o Región Premontañosa*. En este último sector se localizan las mayores alturas de la zona, las que no superan los 300 msnm. Las cotas más bajas son de 85 msnm y corresponden a la costa del río Paraná. Los desniveles más importantes se dan en los cursos de agua que presentan perfiles abruptos con pendientes cortas, y en las escarpas de los sectores más elevados (*cerros*).

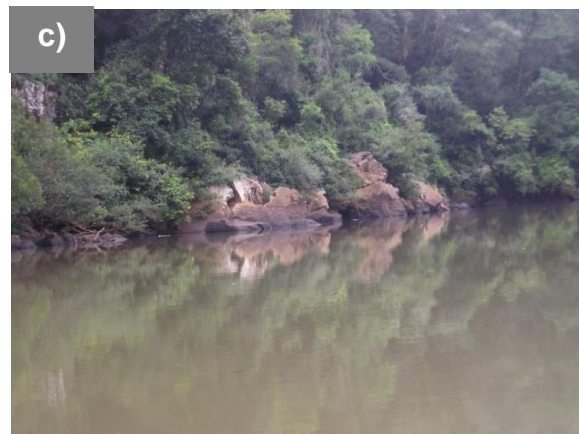
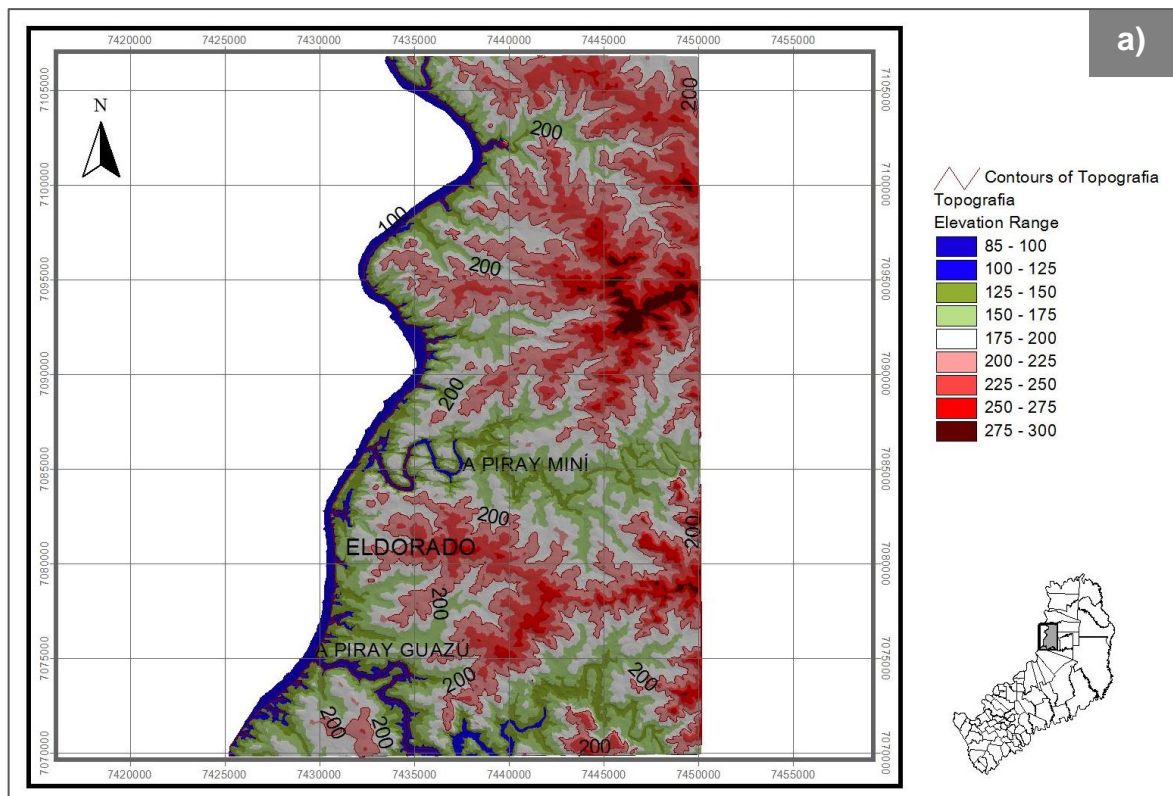


Figura 4.2: Topografía de la zona de estudio. a) Superficie TIN (redes irregulares de triángulos) creada con curvas de nivel de 5 m de equidistancia. Fotografías b, c) Barrancas con pendientes cortas y abruptas observadas en arroyos del área de Eldorado. Fotografías d, e) Colinas bajas del tipo “media naranja” con distintos usos del suelo (monte nativo y ganadería) en la Ruta Provincial N° 15 (al sur de la zona de estudio).

Suelos

El clima cálido y húmedo, el relieve de serranías y planicies conformadas sobre los basaltos de Serra Geral, la vegetación dominante de la Selva Paranaense y el tiempo transcurrido, son los factores de formación de los suelos de Misiones y NE de Corrientes que, según Pereyra (2012), poseen características únicas y serían, algunos de ellos, los más antiguos del país. Estos factores favorecieron la ocurrencia de procesos pedogenéticos que actuaron principalmente sobre los *regolitos* formados a partir de la meteorización química de las litologías basálticas y, en menor medida, sobre sedimentos fluviales y eólicos. De acuerdo a Pereyra (2012), los procesos dominantes para esta región son la meteorización química, laterización, argiluviación, *littering* (acumulación de mantillo forestal) y melanización, esta última con menor importancia. Dichos procesos dieron como resultado suelos rojos, debidos al alto contenido de óxidos e hidróxidos de Fe y Al; con baja capacidad de intercambio catiónico (CIC), atribuida al predominio de arcillas caoliníticas; ácidos; desaturados y con bajos contenidos de materia orgánica.

Tradicionalmente estos materiales han sido descriptos como residuales, es decir, formados *in situ* a partir de los basaltos de Serra Geral. No obstante, existen otras interpretaciones sobre su génesis, como por ejemplo, la propuesta por Iriondo y Kröling (1997) que sostienen la hipótesis de una depositación de sedimentos eólicos recientes (Pleistoceno Superior - Holoceno Superior), finos y de color rojo, denominados *loess tropical*, que se habrían acumulado en forma de manto sobre el paisaje de colinas y serranías de Misiones (Peniplanicie de Apóstoles y Superficie Velhas). Dichos materiales, designados como Formación Oberá (Iriondo *et al.* 1997), habrían tenido su origen en la deflación de depósitos aluviales de los ríos Paraná y Uruguay, y se habrían depositado por actividad eólica en el noreste de Corrientes, Misiones y en la cuenca alta del río Uruguay en Brasil (Iriondo y Kröling 2008). Según explican los autores, estos sedimentos serían el material originario de algunos Ultisoles y Oxisoles que son suelos característicos de la provincia. El perfil tipo de la Formación Oberá se encuentra sobre la Ruta Nacional N° 14, a 10,5 km al norte del acceso principal a la ciudad de Oberá (Sierra de Misiones o Central).

Con respecto a los inventarios de suelo, el primer levantamiento a escala provincial fue ejecutado por la Compañía Argentina de Relevamientos Topográficos y Aerofotográficos C.A.R.T.A. (1964), en base a trabajos de fotointerpretación realizados en gabinete y a controles de campo efectuados en las áreas accesibles de aquel entonces. Los suelos distinguidos fueron agrupados en 11 Complejos con aptitudes similares de uso y representados en 90 cartas edafológicas a escala 1:50.000. El trabajo de C.A.R.T.A. (1964) diferencia suelos derivados de sedimentos fluviales del río Paraná (Complejo 1); de sedimentos fluviales del río Uruguay (Complejo 2); de sedimentos aluvionales de los principales arroyos (Complejo 3); de sedimentos aluvionales antiguos de la zona de Iguazú (Complejo 7); de aluviones antiguos de terrazas del río Paraná (complejo 11); de areniscas (Complejo 10) y derivados de la alteración de rocas basálticas (Complejos 4, 5, 6A, 6B, 8 y 9). Según este trabajo, los de mayor importancia agrícola para Misiones corresponden a los Complejos 9, 6A y 8. Los primeros contienen a la denominada “tierra colorada”, un conjunto de suelos rojos profundos, ácidos, con baja capacidad de intercambio, fertilidad

elevada sólo en el primer horizonte y fácilmente erosionables. Estos suelos se consideran aptos para el cultivo de especies importantes en la provincia, como el té, la yerba mate, el tung, la araucaria, y otras. Con respecto a los 6 A, son los suelos químicamente más fértiles de Misiones (Aranda 1974) y menos ácidos que la “tierra colorada”, debido a que están mejor provistos en bases, y además son menos susceptibles a la erosión que los del Complejo 9. Se trata de suelos jóvenes, llamados también “pedregosos”, cuyas características los hacen especialmente aptos para cultivos anuales exigentes en nutrientes, como por ejemplo, el tabaco (Aranda 1974). Según este autor los cultivos de té, yerba mate y tung realizados en los 6 A no tienen los mismos rendimientos que en los suelos 9, siendo estos últimos mejores para la producción de dichos cultivos. En relación con los suelos del Complejo 8, a diferencia de los 6A y 9 -que se encuentran ampliamente distribuidos en toda la provincia- éstos sólo se localizan en la zona de San Antonio y Bernardo de Irigoyen, en el NE de Misiones. Se trata de suelos semejantes a los del Complejo 9, pero mucho más fértiles (Aranda 1974). Las demás unidades identificadas por C.A.R.T.A. (1964), incluyen suelos hidromórficos (Complejos 3 y 7); poco profundos (Complejo 4); ubicados en fuertes pendientes (Complejo 6B) y suelos de escasa extensión areal (Complejos 1, 2, 5 y 10). Dichas características hacen que, en algunos casos, el uso recomendado para los mismos se limite al desarrollo de plantaciones forestales o a la conservación del bosque nativo.

Actualmente, si bien las unidades C.A.R.T.A. (1964) todavía se utilizan en algunos ámbitos, los suelos de la provincia se describen según el sistema de clasificación Soil Taxonomy. De los doce órdenes que componen este sistema, en Misiones están presentes seis de ellos, representados por los Ultisoles, Alfisoles, Oxisoles, Molisoles, Inceptisoles y Entisoles. En el Cuadro 4.1 se resumen las principales características de estos suelos según las descripciones dadas por Pereyra (2012).

De acuerdo con los antecedentes citados, en Eldorado predominan los suelos del Complejo 9, acompañados, en menor medida, por los Complejos 6A, 6B y 3, estos últimos con una extensión restringida. Por otra parte, según la clasificación Soil Taxonomy, los suelos del área de estudio corresponden a los Órdenes Ultisoles, Alfisoles y Molisoles, representados en esta zona principalmente por los subórdenes kandiidultes ródicos, kandiidalfes ródicos y hapludoles énticos. Según se describe en el Atlas de suelos de la República Argentina (SAGyP, INTA, Proyecto PNUD ARG 85/019 – Área Edafológica, 1989), los primeros integran el grupo de suelos conocidos como “tierra colorada”, cuya principal limitación es la elevada susceptibilidad a la erosión hídrica que presentan. Si bien tienen una fertilidad natural baja, poseen buena aptitud para cultivos perennes (yerba mate, té, tung) y forestaciones. En el segundo caso, se trata de suelos que también forman parte del conjunto denominado “tierra colorada”, pero son más fértiles que los primeros. Son aptos para los mismos cultivos y también muy vulnerables a la erosión hídrica. Por último, los Hapludoles énticos se describen como suelos someros a moderadamente profundos, ricos en nutrientes pero con problemas de pedregosidad y alto riesgo de erosión. Por las posiciones que ocupan en el paisaje (sectores escarpados o inclinados) sólo tienen aptitudes forestales. De acuerdo a la clasificación por capacidad de uso, la mayor parte de los suelos

del área de estudio pertenecen a la clase IIe, la de mayor vocación agrícola. También se encuentran suelos de las clases IVe, VIes, VIIes y VIIIs, cuyas aptitudes son moderadas a bajas y hasta no aptas para la producción agropecuaria, como es el caso de la clase VIIIs (afloramientos rocosos).

Se puede decir que los usos dados a estos suelos, en general, han sido consistentes con las aptitudes antes mencionadas. Si bien actualmente la mayor parte de las superficies agrícolas de Eldorado se encuentran ocupadas por plantaciones forestales con especies exóticas, durante las primeras décadas del siglo pasado tuvieron mucha importancia en la zona otros cultivos, como por ejemplo, el tabaco, la yerba mate, el tung y los cítricos (Arenhardt 2009).

CUADRO 4.1: PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS ÓRDENES (SOIL TAXONOMY) DE SUELOS PRESENTES EN LA PROVINCIA DE MISIONES, SEGÚN PEREYRA (2012).

| CARACTERÍSTICAS | OXISOLES | ALFISOLES | ULTISOLES | MOLISOLES | ENTISOLES E INCEPTISOLES |
|---|---|--|---|--|---|
| PROCESOS PEDOGENÉTICOS PRINCIPALES | Meteorización química intensa con importante acumulación de óxidos e hidróxidos de Al y Fe. | Procesos de migración y/o acumulación de arcillas en un horizonte subsuperficial (Bt). | Procesos de migración y/o acumulación de arcillas en un horizonte subsuperficial (Bt). | Procesos de melanización con la formación de un horizonte mólico. | |
| PERFILES | Color rojo, perfiles profundos y sin diferenciación. Horizonte B óxico. | Colores rojizos y perfiles profundos. Horizonte Bt (argílico) potente más saturado en bases que en los Ultisoles., | Colores rojizos y perfiles profundos. Horizonte Bt (argílico o kándico) potente menos saturado en bases que en los Alfisoles. | Horizontes simples y potentes (A-AC-C). Horizonte mólico. | Perfiles con bajo a muy bajo grado de desarrollo. Inceptisoles tienen más desarrollo que los entisoles. Ambos sin hz. diagnósticos. |
| MATERIA ORGÁNICA (MO) / FERTILIDAD | Escaso contenido de MO y muy baja fertilidad. | Horizonte A delgado y pobre en materia orgánica. | Horizonte A de escaso espesor y con contenidos variables de MO. | Horizontes superficiales oscuros y bien provistos de materia orgánica. | Entisoles con un horizonte A con MO (ligeramente enriquecido). |
| DISTRIBUCIÓN | Exclusivos de Misiones y NE de Corrientes. En Misiones pequeñas superficies restringidas a la meseta central, en posición de loma y media loma. | Superficies importantes en la zona sur de Misiones y la Región de <i>Relieve fuertemente ondulado</i> en el sector oriental de la provincia. | Predominantes en Misiones. Pertenecen a los suelos denominados <i>tierra colorada</i> | Superficies menores, asociadas a sectores transicionales con la selva. <i>Relieve montañoso fuertemente disectado</i> en sectores escarpados o inclinados. | Divisorias e interfluvios. Vías de avenamiento. |
| GRANDES GRUPOS | Hapludoxs. | Kandiudalfes Kanhapludalfes Rodudalfes | Kandihumultes Kandiudultes | Hapludoles | Haplumbreptes Udortentes |

Hidrología

Las principales cuencas hídricas de Misiones corresponden a los ríos Paraná y Uruguay, junto con las cuencas del río Iguazú, afluente del Paraná, y de los ríos San Antonio y Pepirí Guazú, tributarios del Iguazú y Uruguay, respectivamente.

El área de estudio está ubicada sobre la vertiente del río Paraná, en un sector donde desembocan varios arroyos, tales como el Piray Guazú, Piray Miní, Aguaray Guazú, Aguaray Miní, Yacutinga, Parehá y otros (Figura 4.3 a). La zona presenta estructuras lineales (fracturas y grandes diaclasas) con orientaciones NE-SW, NW-SE y E-W, las cuales han influenciado el desarrollo de la red de drenaje. Los arroyos más importantes son el Piray Guazú, cuya cuenca es la segunda más grande de la provincia (2.250,2 Km²) y el Piray Miní (1.470,2 Km²), ambos límites naturales del municipio de Eldorado. La separación de las cuencas tributarias que desaguan en estos dos arroyos y en el río Paraná, está constituida por dos divisorias principales (entre 250 y 275 msnm) que tienen dirección general E-W y NE-SW, y por interfluvios de menor altura (entre 200 y 250 msnm) con direcciones generales NW-SE y NE-SW. El trazado original de la localidad de Eldorado se dispuso justamente sobre las divisorias entre los arroyos Piray Miní y Piray Guazú, a través de un frente de colonización conocido como “Picada Maestra” (Arenhardt 2009).

Un aspecto característico de los cursos de agua labrados sobre los basaltos de Serra Geral es la existencia de saltos y cascadas. La formación de estos desniveles se atribuye a procesos de erosión retrocedente, en los que el tipo de diaclasamiento y las diferentes resistencias que presentan los niveles vesículo-amigdalares y masivos de las rocas basálticas, son factores condicionantes en el modelado de estos rasgos. En la zona de Eldorado existen varias cascadas de este tipo entre las que se destacan los saltos Küppers, Helena y Pomar, todos ubicados muy cerca de la desembocadura en el río Paraná. En algunos casos, estos lugares son utilizados por la población local con fines recreativos (Figura 4.3 b-d). Asimismo, por sus características y caudales, los arroyos más importantes de la zona (Piray Guazú y Piray Miní) se consideran potencialmente aptos para la generación de energía a través de la construcción de aprovechamientos hidroeléctricos.

Muchos de los arroyos de Misiones son también recursos importantes para la provisión de agua potable. De igual manera, las aguas subterráneas que conforman los acuíferos alojados en los basaltos de Serra Geral y, en menor medida, en las areniscas subyacentes (acuífero Guaraní), constituyen fuentes esenciales para el abastecimiento de la población rural y de algunas localidades del interior de la provincia. En el caso de Eldorado, la provisión actual de agua se realiza utilizando ambas fuentes. La mayor parte de la ciudad se abastece del arroyo Piray Miní, donde existe una toma de agua que bombea hacia una planta potabilizadora. El resto de la demanda se satisface parcialmente a través de perforaciones en el basalto (entre 80 y 120 m de profundidad) y de excavaciones someras (pozos entre 2 y 6 m de profundidad), estas últimas muy expuestas a la contaminación, especialmente en las zonas más densamente pobladas. Para abordar los problemas de abastecimiento, recientemente (2016) comenzó la ejecución de una nueva toma de agua que estará ubicada sobre el río Paraná y funcionará junto con una planta potabilizadora y bombeo.

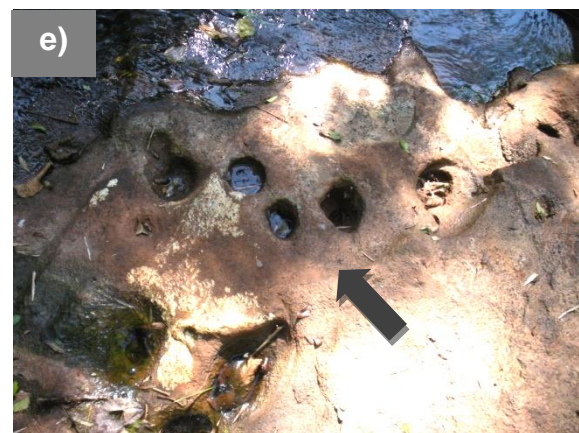
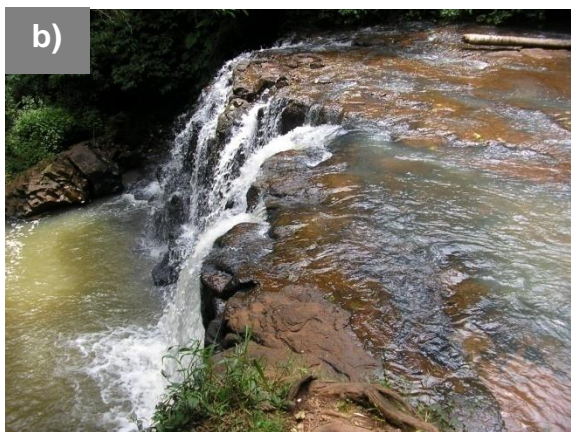
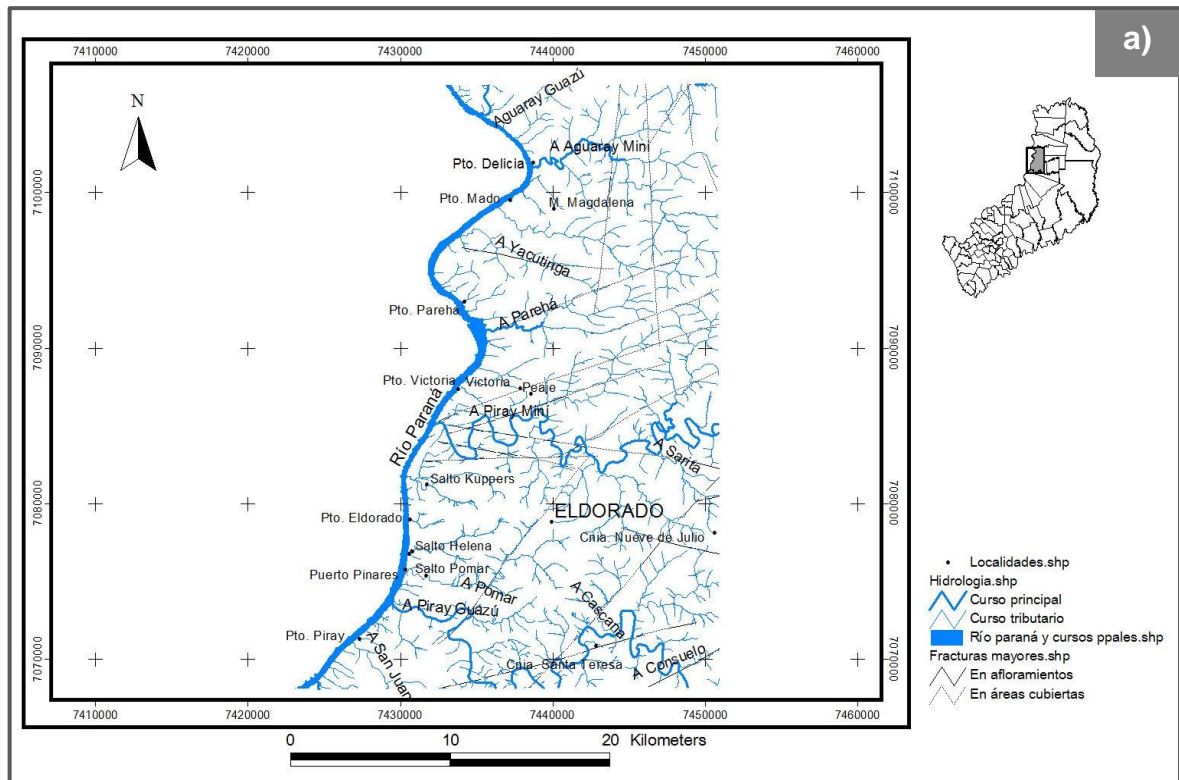


Figura 4.3: Rasgos hidrológicos de la zona de estudio. a) Mapa con la red de drenaje del área de Eldorado donde se indican los cursos de agua principales. Fotografías b, c y d) Saltos Küppers, Helena y Pomar. En el primer caso se observa una cascada con un único desnivel vertical, mientras que en el segundo, el desnivel se presenta escalonado. e) Marmitas formadas en el lecho rocoso de un arroyo de la zona (señaladas con la flecha gris).

Flora, fauna y áreas naturales protegidas

Misiones pertenece a la ecorregión denominada Bosque Atlántico de Sudamérica, la cual ocupa la costa atlántica de Brasil, el este de Paraguay y el noreste de Argentina. Esta vasta unidad está integrada, a su vez, por 15 ecorregiones, dos de las cuales están presentes en Misiones: el Bosque Atlántico del Alto Paraná o Selva Paranaense, que abarca la mayor parte del territorio, y los Bosques de Araucarias que se encuentran en el NE de la provincia. Este complejo de ecorregiones ha sido identificado como una zona caliente para la conservación de la biodiversidad (*biodiversity hotspot*), debido principalmente a amenazas centradas en áreas con endemismos importantes. La expansión de la agricultura, el desarrollo de obras de infraestructura (represas, caminos etc.), el aprovechamiento no sustentable del bosque nativo y la caza ilegal, son algunas de las causas identificadas para la degradación y fragmentación de estos hábitats naturales (Di Bitetti *et al.* 2003).

La mayor biodiversidad de mamíferos del país se encuentra en la Selva Paranaense. De Ángelo *et al.* (2008) mencionan diez órdenes que están presentes en el Bosque Atlántico de Misiones. Estos autores citan especies de marsupiales (comadreja, cuica y colicortos); edentados o xenarthras (oso hormiguero, oso melero, tatú mulita y otros); chiropteros (una gran cantidad de especies de murciélagos); primates (mono caí, aullador negro, aullador rojo); lagomorfos (conejo tapetí); carnívoros (yagareté, puma, ocelote, zorros, hurones, aguará popé, coatí y otros); ungulados (anta o tapir, dos especies de pecaríes o chanchos de monte, tres especies de corzuelas) y roedores (gran cantidad de especies). Algunos de estos mamíferos, al igual que ciertas aves y especies de la flora nativa, se consideran especialmente importantes, vulnerables o en peligro, por lo que han sido declarados Monumentos Naturales Provinciales, como por ejemplo, el yagareté (*Panthera onca*); oso hormiguero (*Mymecophaga tridactylia*); anta o tapir (*Tapirus terrestris*); carayá rojo (*Alouatta guariba*); águila harpía (*Harpia harija*); tordo amarillo (*Xanthopsar flavus*); pino paraná (*Araucaria angustifolia*); palo rosa (*Aspidosperma polyneuron*), entre otros.

Aproximadamente un tercio de la superficie de Misiones se encuentra protegida bajo algún tipo de categoría ambiental. Las áreas naturales protegidas integran un sistema creado por la Ley Provincial XVI-N° 29 y pertenecen a distintas jurisdicciones. Existen 4 áreas nacionales; 34 áreas provinciales (parques, monumentos naturales, reservas ícticas, reservas naturales culturales, reservas de usos múltiples y paisajes protegidos); 22 reservas privadas y 5 parques naturales municipales (MEyRNR). En la zona de estudio hay sólo tres áreas protegidas: el Parque Natural Municipal Salto Küppers (64 ha), la Reserva Privada Santa María del Aguaray Miní (64 ha) y la Reserva Privada Virgen de Patycuá (82 ha).

La Figura 4.4 muestra los remanentes de monte nativo que se conservan en Eldorado, representados según el Inventario Nacional de Montes Nativos (2010). Estos remanentes se clasifican, además, en las categorías I, II y III, establecidas por la Ley de Ordenamiento de Bosques Nativos (Ley Provincial XVI N° 105 y Ley Nacional 26.331/10). Las dos primeras no permiten el cambio de uso; sí es posible, de acuerdo a ley, convertir las superficies identificadas con la categoría III, las cuales corresponden a bosques secundarios, bosques rurales y áreas con bosques degradados en tierras agropecuarias. La Figura 4.7-a muestra cómo se distribuyen estas categorías en la zona de estudio.

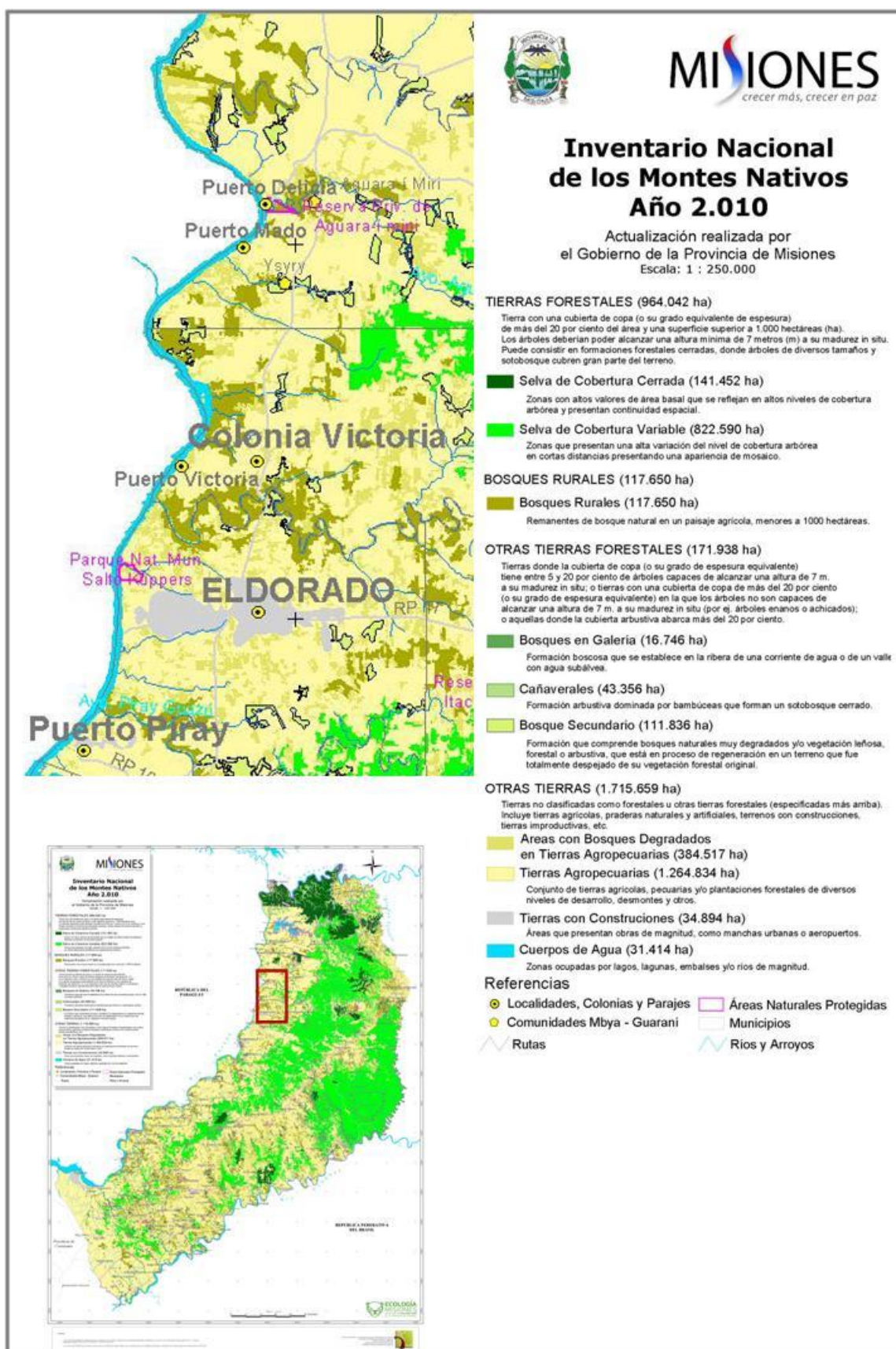


Figura 4.4: Distribución de los remanentes de bosques nativos en la zona de estudio según el Inventario Nacional de los Montes Nativos Año 2010 (actualización realizada por el Gobierno de la Provincia de Misiones). El mapa fue tomado del sitio IDE Misiones <http://www.ide.misiones.gov.ar/>. Las superficies que figuran en las referencias no corresponden a la zona de estudio sino a totales provinciales.

Arqueología

En la síntesis realizada por Loponte y Carbonera (2015) sobre el poblamiento original de Misiones, se mencionan tres períodos cuyas características se resumen en el Cuadro 4.2. De acuerdo con este trabajo, la presencia del hombre en el territorio provincial tiene probablemente 10.000 años, durante los cuales existieron grupos humanos -anteriores al arribo de los guaraníes- que fueron cazadores recolectores y posteriormente también agricultores. Los guaraníes habrían llegado a Misiones hace aproximadamente 1500 años, según se infiere en el citado trabajo, a partir de dataciones radiocarbónicas realizadas en dos sitios ubicados en las localidades de Panambí y Corpus, respectivamente.

| CUADRO 4.2: ARQUEOLOGÍA PRECOLONIAL DE MISIONES (LAPONTE y CARBONERA 2015) | | | | | |
|---|------------------------|--|----------------------|---|--|
| DENOMINACIÓN DEL PERÍODO O UNIDAD ARQUEOLÓGICA | EDAD ¹ A.P. | RESTOS ARQUEOLÓGICO CARACTERÍSTICOS | DISTRIB. EN MISIONES | SITIOS CON ESTRATIGRAFÍA | |
| | | | | Nombre | Exc. por: |
| TARDÍO En Argentina: ELDORADENSE En Brasil: ITARARÉ / TAQUARA | ~<800 ~< 3500 | Cerámica (recipientes para almacenar alimentos) Anzuelos óseos Arquitectura funeraria | Toda la provincia | Varios sitios cercanos a la ciudad de Eldorado | Menghin (1957) |
| INTERM. En Argentina: ALTOPARANAENSE En Brasil: HUMAITÁ | ~8000-? | Nivel precerámico Artefactos líticos (clavas) | Toda la provincia | Nivel Precerámico excavado en la Cueva Tres de Mayo (Garuhapé) | N.Rizzo ² |
| TEMPRANO En Argentina: ULF MONSTED O MOCORETÁ En Brasil: UMBÚ O TRADICIÓN UMBÚ | 9400-7000 | Artefactos líticos (puntas de proyectil y artefactos laminares) | Toda la provincia | Ulf Monsted (Eldorado) Isla Cañete (Posadas) Varios sitios cercanos a P.Esperanza | N.Rizzo ² R.Poujade ³ Citados ⁴ |

Referencias: (1) Edades en algunos casos estimadas a partir de sitios datados en Brasil o datadas con radio carbono; (2) No se publicaron los resultados detallados; (3) Citado en Ceruti (2013) y (4) en Mujica (2007).

En la zona de estudio han sido hallados restos arqueológicos que corresponden a los tres períodos que se muestran en el Cuadro 4.2. Se destacan al respecto los artefactos líticos del período denominado Ulf Monsted, que consisten en puntas de proyectil y artefactos laminares, y las clavos del período Altoparanaense. También son importantes las cerámicas que caracterizan al período Eldoradense (Argentina) o Itararé/Taquara (Brasil), descritas por primera vez para Misiones por Menghin (1957). Este investigador también halló en Eldorado restos de tumbas cercadas por anillos exteriores. La zona contiene asimismo sitios arqueológicos guaraníes que fueron excavados en Puerto Victoria y Puerto Lahargue.

El mapa arqueológico de la provincia de Misiones (Poujade 1995), es otro antecedente importante sobre este tema. Si bien en este trabajo se plantea una secuencia cronológico-cultural diferente a la antes expuesta, el mismo permite confirmar la existencia de varios sitios arqueológicos en el Eldorado que se adscriben a las tradiciones Altoparanaense-Humaitá (9950-3950 AP), Umbú (5950-2450 AP), Eldoradense (2000-450 AP) y Tupí Guaraní (1200-290 AP).

Aspectos socioeconómicos

Población

Según el último censo (2010), Eldorado tiene 78.221 habitantes y es el cuarto departamento más poblado de Misiones. En el período 2001-2010 su crecimiento absoluto lo ubicó en idéntica posición, después de los departamentos Capital, Iguazú y Oberá. En términos relativos, creció un 15,5% en el mismo período, lo cual lo sitúa en el sexto lugar después de San Pedro, General Manuel Belgrano, Iguazú, Candelaria y Guaraní (IPEC 2015). Los municipios que lo componen son cinco: Eldorado, 9 de Julio, Santiago de Liniers, Colonia Victoria y Colonia Delicia (Figura 4.5). El municipio de Eldorado (63.931 habitantes), incluye a la ciudad homónima, a los núcleos urbanos de Puerto Pinares y Villa Roulet, y al paraje Las Mercedes. Este distrito tiene la mayor concentración de población urbana del departamento (94%), mientras que 9 de Julio (3839 habitantes), presenta el porcentaje más alto de población rural agrupada (64,9%), y Santiago de Liniers (1950 habitantes), la mayor proporción (72,3%) de población rural dispersa en parajes y picadas. Los datos de 2010 indican que Colonia Victoria tiene prácticamente la misma población que 40 años atrás (2665 habitantes). El Instituto de Estadísticas y Censos de la Provincia (IPEC 2015) explica que esta falta de crecimiento en el número de residentes es un rasgo característico de las zonas donde la actividad forestal se tornó, en las últimas décadas, más importante que la agricultura tradicional (yerba mate, cítricos y tung). Colonia Delicia, por su parte, con 5836 habitantes, muestra un crecimiento constante de su población, la cual está distribuida principalmente en la localidad de María Magdalena (2525 habitantes) y en los parajes Puerto Mado (342 habitantes), Pueblo Nuevo (651 habitantes) y Nueva Delicia o Km 22 (717 habitantes).

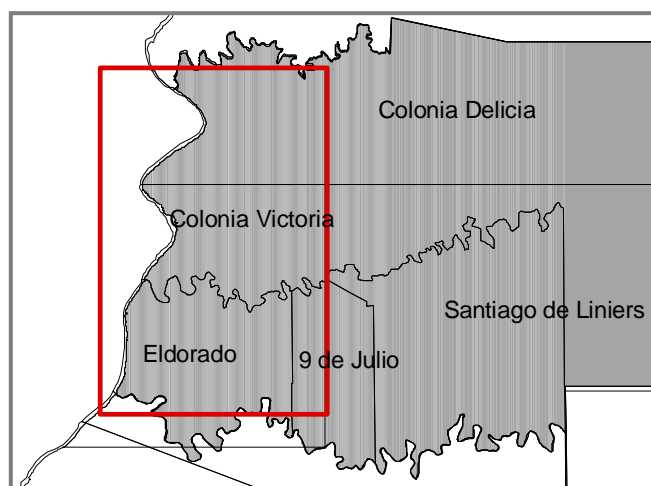


Figura 4.5: Ubicación de la zona de estudio (rectángulo rojo) en el Departamento Eldorado (color gris).

En relación con la actividad económica, se trata de una zona que presenta altos índices de desocupación a nivel provincial. Según el último censo, Colonia Delicia, Colonia Victoria y Eldorado, ocupan el 2°, 6° y 7° puesto de este índice, respectivamente, debido al número de personas -con 14 años y más- que se encuentran en condición de desocupados. Colonia Delicia, asimismo, es el distrito que tiene el mayor porcentaje (59,6%) de población inactiva de Misiones (IPEC 2015).

Con respecto a la población indígena, el 1,1% (13.006 personas) de los habitantes de Misiones se autoreconoce como aborígen o con algún antepasado perteneciente a pueblos originarios (IPEC 2015). En el año 2010, había 92 aldeas Mbya Guaraní identificadas, 59 de las cuales contaban en ese momento con Personería Jurídica y 86 con el reconocimiento de la Dirección Provincial de Asuntos Guaraníes (Sosa y Arellano 2010). En términos generales y según una encuesta (2004-2005) citada por el IPEC (2015), las aldeas están integradas por 20 a 90 personas, llegando las más grandes a 427 residentes. Su forma de vida tradicional combina la agricultura de subsistencia con la elaboración y venta de artesanías, complementadas, en algunos casos, con trabajos asalariados (peones rurales). Las comunidades reconocidas por el Estado reciben asistencia periódica, principalmente alimentaria y de salud, no obstante, su situación socioeconómica es, en general, de indigencia y pobreza (Sosa y Arellano 2010). Con respecto a la propiedad de la tierra, según el IPEC (2015), existen distintas situaciones. Hay aldeas asentadas en propiedades con título o permiso de ocupación, otras ocupan predios privados y algunas se encuentran en reservas ecológicas y de turismo. En este sentido, es oportuno señalar que en el marco de la Ley Nacional 26.160/06 –que suspende los desalojos de comunidades indígenas y ordena el relevamiento técnico, jurídico y catastral de las tierras ocupadas por ellas– actualmente se está ejecutando en Misiones el Programa RETECI (Relevamiento Territorial de las Comunidades Indígenas), el cual, según información oficial (2016), lleva 57 comunidades relevadas y otras 50 por relevar. La Figura 4.6-a muestra la distribución de las aldeas aborígenes en la provincia según la información geográfica proporcionada por el sitio IDE Provincia de Misiones.

En la zona de estudio existen tres aldeas Mbya Guaraní conocidas como Yychyry, Aguai Poty y Aguaray Miní, todas ubicadas en el municipio de Colonia Delicia (Figura 4.6-b). Una de ellas, Aguai Poty, recientemente recibió el reconocimiento de sus derechos –por parte de la Subsecretaría General del Defensor del Pueblo de la Nación– para la posesión y uso pacífico de 523 ha, relevadas en el marco de la Ley 26.160/06.

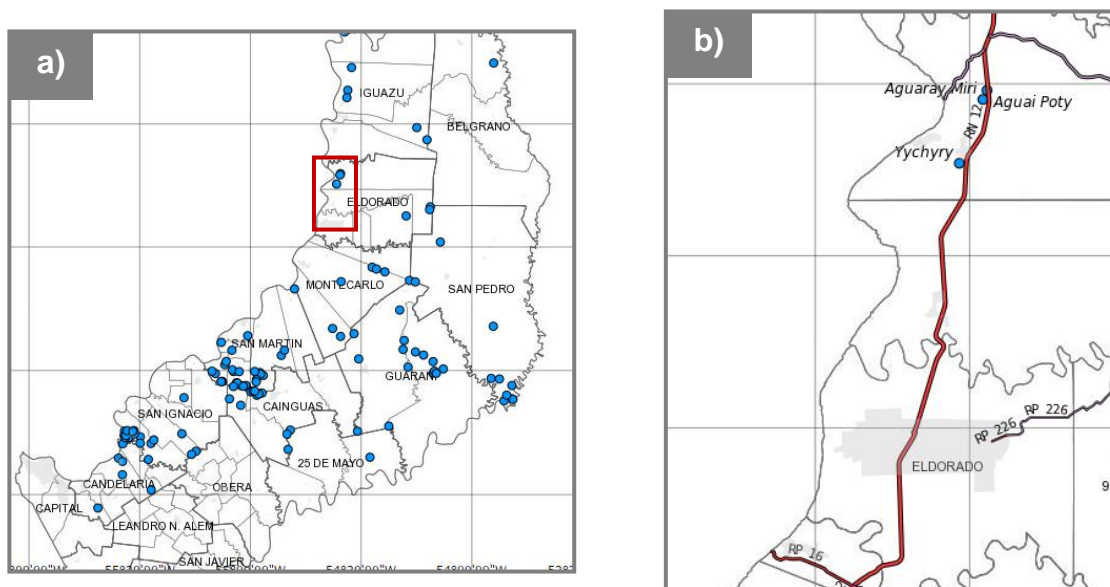


Figura 4.6: Distribución geográfica de aldeas guaraníes. a) Localización en la provincia de Misiones. b) Localización en la zona de estudio. Información tomada del sitio IDE Provincia de Misiones (2016) <http://www.ide.misiones.gov.ar/>.

Usos del suelo

El principal centro urbano en el área de estudio es la ciudad de Eldorado, la cual fue creada a partir de un proyecto de colonización privada, iniciado en 1919 con la llegada de inmigrantes alemanes, daneses, suizos, polacos, rusos y otros. El trazado original de la colonia fue realizado según el modelo alemán *waldhufendorf*, el cual se plasmó en Eldorado a través de un parcelamiento perpendicular a un camino o “picada”, ubicado sobre divisorias de agua o interfluvios. Arenhardt (2009) analiza la ocupación del espacio en esta zona, distinguiendo cuatro etapas sucesivas. La primera (1919-1923), consistió en la apropiación del paisaje natural de selva subtropical, según el modelo antes mencionado; la segunda, continuó con la organización de un paisaje rural desarrollado a partir de la *Picada Maestra* (arteria principal); en la tercera (1949-1971), se estableció un paisaje con características *rururbanas* y, finalmente en la cuarta y última etapa (1972-2008), se consolidó el actual paisaje urbano lineal, estructurado a partir de la Avenida San Martín (construida sobre la *Picada Maestra*).

La Figura 4.7-a muestra el grado de ocupación territorial y la transformación del ambiente natural que ya existía en el área de estudio a principios de la década de 1960, como se puede observar en el mosaico confeccionado con fotos aéreas (1:33.000), correspondientes al relevamiento de CARTA (1962-1963). Para el año 2000, la conversión del monte nativo, así como la de otros usos del suelo, exponían claramente el perfil productivo de esta zona de la provincia (Figura 4.7-b).

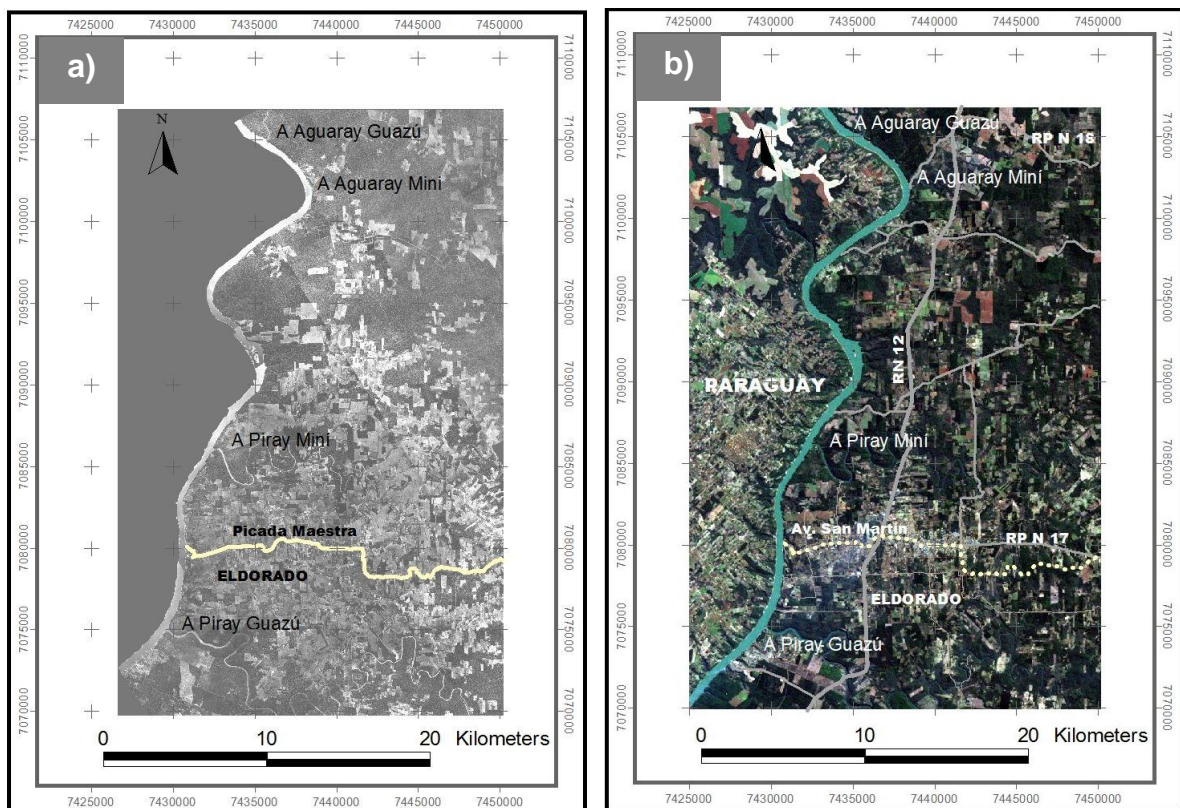


Figura 4.7: Ocupación territorial en la zona de Eldorado. a) Mosaico de fotos aéreas correspondientes al relevamiento de CARTA (1962-1963. b) Situación de la zona en el año 2000 (Imagen Lansat). La línea color amarillo claro, continúa en a) y de puntos en b), indica la traza de la Picada Maestra según Arenhardt (2009).

Los primeros cultivos desarrollados en Eldorado fueron de subsistencia (maíz, mandioca, zapallo, poroto, etc.), pasando luego a diversificarse en cultivos de tabaco, yerba mate, tung y cítricos. La actividad forestal, que en los comienzos se limitaba al aprovechamiento de maderas nativas, se volvió cada vez más importante -desde la década del 40' hasta la actualidad- con la llegada de plantas celulósicas y el desarrollo de plantaciones de especies exóticas (pinos, eucaliptus y otros). Al respecto, Schvorer (2003) señala que esta conversión provocó un cambio progresivo de explotaciones pequeñas y medianas, con cultivos diversificados, a una ocupación de tierras cada vez más concentrada y limitada al aprovechamiento forestal de bosques implantados en grandes propiedades. La Figura 4.9 muestra la distribución (2016) de los remanentes de bosque nativo, junto con los rodales forestales y las plantaciones de citrus y yerba mate que se encuentran en la zona de estudio, según la información proporcionada por el sitio de Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) de la Provincia de Misiones.

Actualmente Eldorado forma parte de la Micro-Región del Alto Paraná, la cual está integrada también por los municipios de Colonia Delicia, Colonia Victoria, 9 de julio, Santiago de Liniers y Puerto Piray (225.962 ha en total). El Plan Estratégico de Desarrollo Económico propuesto para esta zona de Misiones (Molinatti 2010), contiene, entre otros, un análisis de las condiciones actuales del territorio en el cual se describen los usos del suelo de la Micro-Región. De acuerdo con este documento, los usos urbanos ocupan menos del 2% de la superficie, por lo que se trata de un territorio predominantemente rural en el que los bosques nativos representan un 44%, estando el restante 54% ocupado por forestaciones, agricultura, pasturas y suelos sin cobertura (SIGel, 2009 y SIGel, 2007, citados en Molinatti 2010). Según este trabajo el municipio de Eldorado tiene la mayor superficie urbana, la cual habría pasado de 490 hectáreas en 1963 a 3000 hectáreas en 2006. De igual manera, se habrían incrementado las forestaciones que pasaron de 2300 a 3900 hectáreas entre 1963 y 2006.

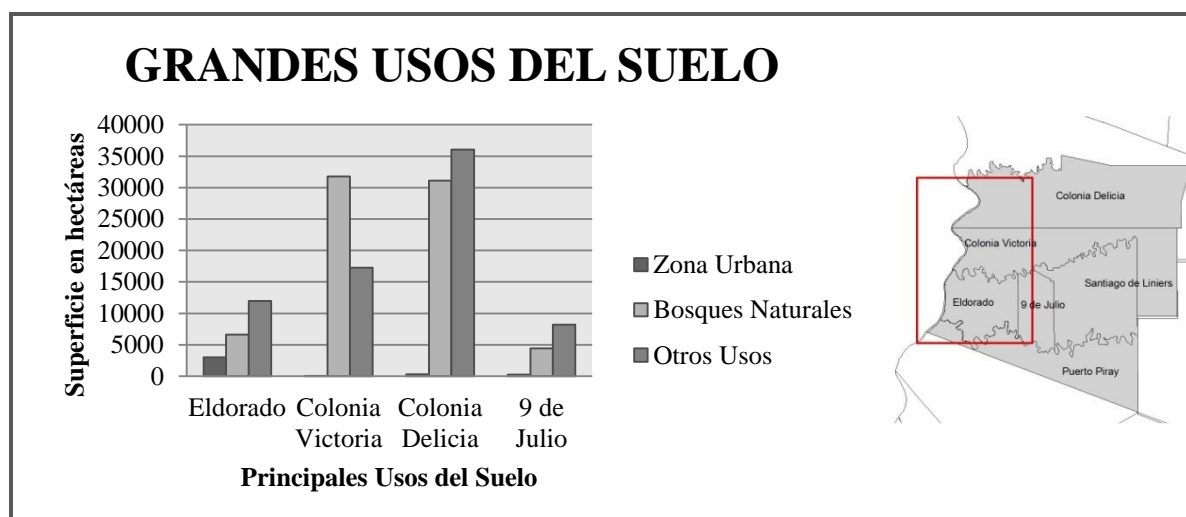


Figura 4.8: Grandes usos del suelo en los municipios incluidos en la zona de estudio (indicada con el rectángulo rojo). Cabe precisar que dicha zona abarca al municipio de Eldorado completo y sólo una parte de Colonia Victoria, Colonia Delicia y 9 de Julio. Los datos corresponden al Sistema de Información Geográfico (SIG) del Municipio de Eldorado (2009), y están citados en Molinatti (2010).

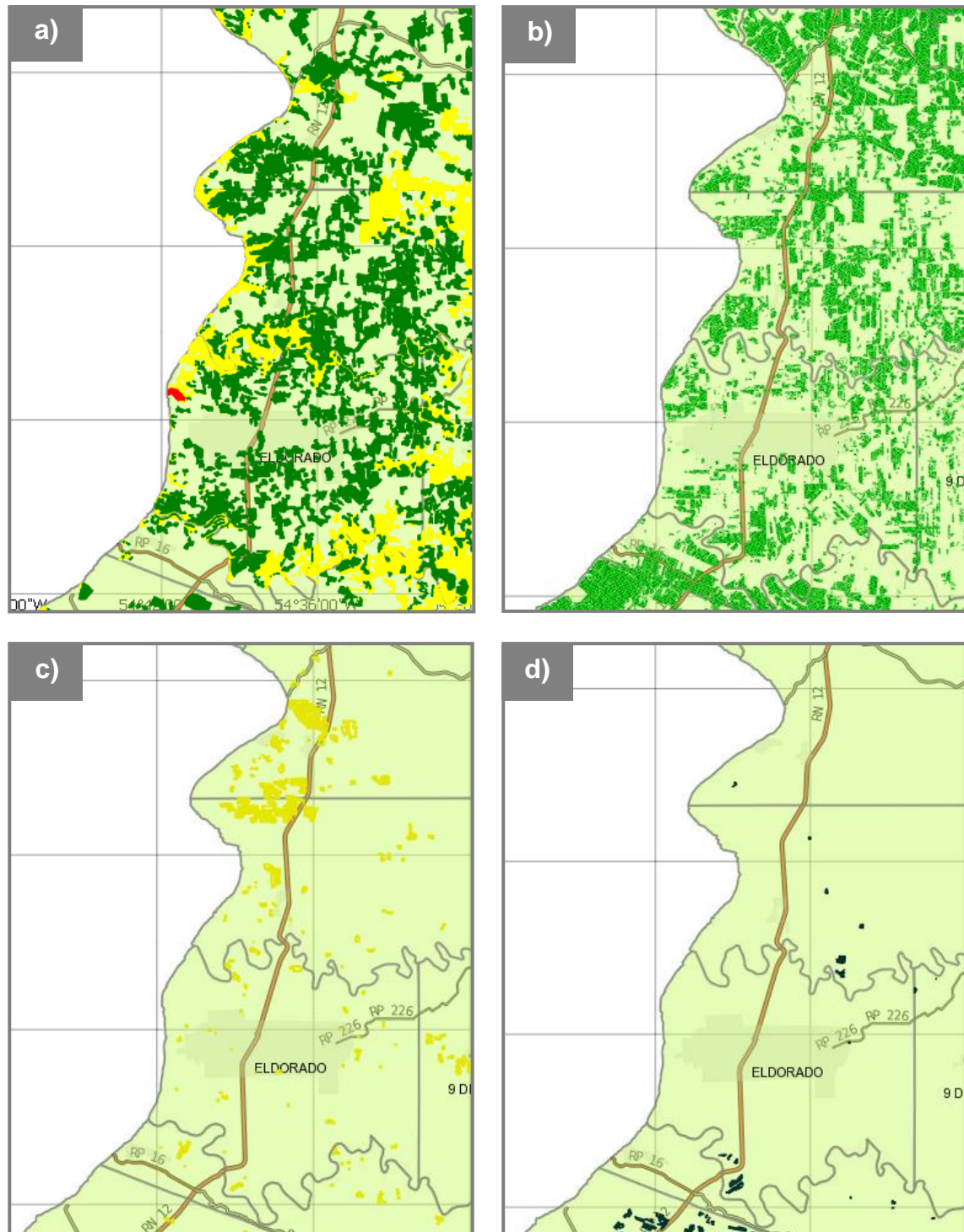


Figura 4.9: Distribución de algunos usos del suelo en la zona de estudio. a) Bosques Nativos clasificados según las categorías I (rojo), II (amarillo) y III (verde) de la Ley de Ordenamiento de Bosques Nativos de la Provincia de Misiones (Ley Provincial XVI N° 105 y Ley Nacional 26.331/10). b) Bosques implantados (rodiales forestales en verde oscuro). c) Plantaciones de citrus (en amarillo). d) Plantaciones de yerba mate (en azul). Información tomada del sitio IDE Provincia de Misiones (2016) <http://www.ide.misiones.gov.ar/>.

Las aptitudes de uso de los suelos del municipio de Eldorado fueron evaluados a través del proyecto SIGel (Sistema de Información Geográfico del Municipio de Eldorado). Los resultados obtenidos indican aptitudes favorables, principalmente para el desarrollo de actividades agrícolas, forestales, ganaderas, y, en menor medida, también apícolas y agroturísticas.

Los impactos ambientales de la minería del basalto en Misiones. Una caracterización general.

Datos sobre la minería del basalto en Misiones

La minería de Misiones consiste en la extracción de basalto, arenas fluviales, suelo rojo, arcilla, arenisca (piedras lajas) y piedras preciosas (ágata, amatista y jaspe). Actualmente, la actividad está centrada en el aprovechamiento de áridos que se emplean como materiales de construcción y ornamento. A modo de referencia, al final de este apartado (Figura 4.11), se muestra la posición que ocupa Misiones a nivel nacional, según las estadísticas mineras elaboradas por organizaciones que integran el sector de los áridos en Argentina (Fontana *et al.* 2016).

La Figura 4.10 muestra los volúmenes de extracción de basalto y arenas fluviales, registrados (2005-2013) por la autoridad minera provincial, en base a las planillas de rendición presentadas por productores inscriptos.

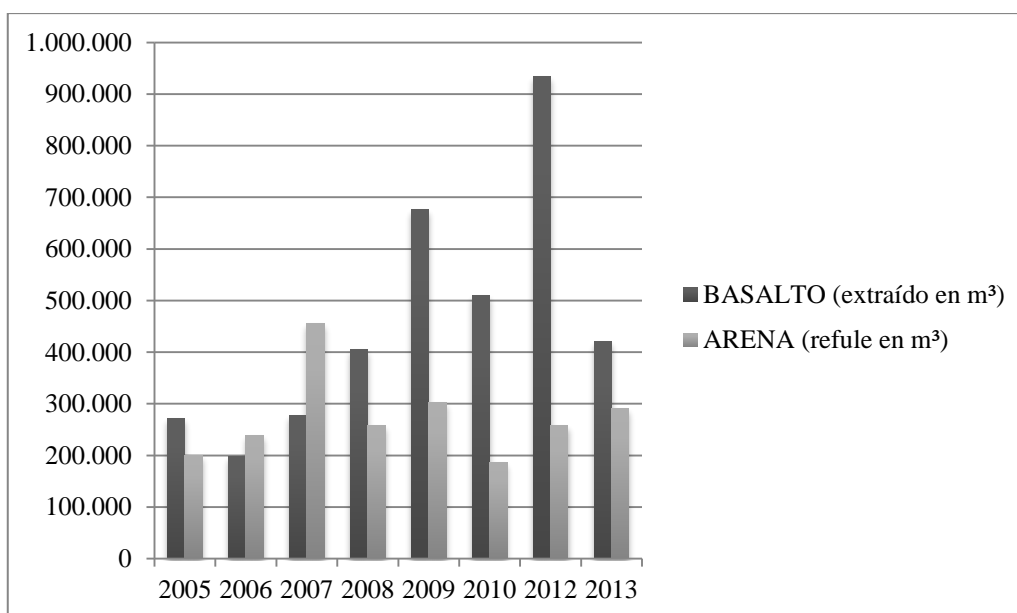


Figura 4.10: Registros de la extracción de basalto y arenas de río proporcionados por la Dirección General de Geología y Minería de Misiones.

En general, la extracción de basalto es la que reporta los mayores valores anuales. Se trata de una actividad que está presente en muchos de los municipios de la provincia, debido a las demandas locales que generan las obras públicas y privadas (construcción de viviendas, empedrados, asfaltado de calles, obras de arte, etc.).

En este sentido, son particularmente importantes las necesidades derivadas del sector vial (construcción de rutas, nuevos puentes, etc.), cuyas obras utilizan gran cantidad de rocas basálticas para la ejecución de bases granulares, mezclas asfálticas, hormigones, entre otros. El suministro de estos materiales se realiza a través de canteras que son abiertas y explotadas por las empresas viales, por lo que varias de ellas están inscriptas en la provincia como productoras mineras. La ubicación, diseño, instalaciones, equipamiento y vida útil de estas explotaciones, responde a criterios diferentes a los empleados en las

canteras comerciales, ya que el objetivo de las mismas se limita a satisfacer las necesidades de la/s obra/s a ejecutar. En estos casos, se busca generalmente que la ubicación de los lugares de extracción quede lo más equidistante posible a la longitud del tramo a construir, con el objetivo de disminuir los costos de transporte. Asimismo, el diseño de las explotaciones se realiza en función de la necesidad de la obra y generalmente las instalaciones incluyen, en el mismo sitio, obradores, talleres, plantas de trituración y fabricación de asfalto. Las empresas constructoras también suelen incorporar plantas de trituración móviles que, en ciertos casos, pueden emplearse en obras que involucran importantes movimientos de roca.

Por otra parte, las canteras comerciales medianas y grandes (>5000 Tn mensuales) se encuentran próximas a las zonas de mayor demanda y situadas sobre o cercanas a rutas preferentemente pavimentadas. Las instalaciones comúnmente incluyen plantas de trituración, balanza, talleres y oficinas. Algunas de estas canteras producen agregados pétreos, principalmente para la fabricación de hormigón. Esto último es una referencia importante en relación con los usos, ya que para esta aplicación se emplean principalmente las granulometrías intermedias (6-19 mm) y gruesas (19-32 mm), quedando los finos de trituración (0-6 mm) acumulados en grandes acopios, a la espera de eventuales requerimientos del sector vial (Figura 4.13-g). Esta situación está generando interés y algunas iniciativas para obtener arenas manufacturadas (0-4 y 4-6 mm) a partir de este material, muchas veces subaprovechado y transformado en pasivo ambiental. Consultas realizadas –en canteras viales y comerciales- coincidieron en la estimación de que por cada tonelada de basalto triturado, se producen aproximadamente 0,2 Tn de granulometrías finas (20%).

En el caso de las explotaciones de menor tamaño, comúnmente emprendimientos familiares, por lo general tienen circuitos de venta acotados y un funcionamiento sujeto a las demandas de los comercios locales (corralones) y de las obras públicas municipales. Los productos usuales son agregados para morteros y hormigones, y adoquines para la construcción de empedrados de calles. Éstos últimos se producen de manera artesanal y con herramientas muy simples. Las explotaciones más pequeñas cuentan con instalaciones y equipamientos básicos, siendo frecuente en ellas la tercerización de ciertas tareas, como por ejemplo, el uso de explosivos para la formación de bancos.

La explotación de las rocas basálticas en Misiones incluye además el aprovechamiento del basalto alterado, conocido en la provincia como *tosca* (Figura 4.12). Este material es muy utilizado para el mantenimiento de caminos terrados y para la construcción de obras básicas y pavimentos, donde se lo emplea usualmente como componente del paquete estructural y en la consolidación de banquetas. Si bien estas explotaciones abundan en la provincia, no existe un registro de las mismas, por lo que la mayoría de las veces se trata de una actividad informal. El trabajo se realiza con un mínimo de equipos (excavadoras y camiones), ya que no es necesario realizar voladuras para la extracción del material. Como los horizontes alterados pueden presentar formas irregulares, dadas por la alteración de mantos de diferente espesor, la forma de estas explotaciones suele resultar también irregular. Esto provoca, entre otros, cambios paisajísticos que terminan degradando la

calidad ambiental, debido a que no es habitual que se realicen trabajos de restauración en los sitios intervenidos.

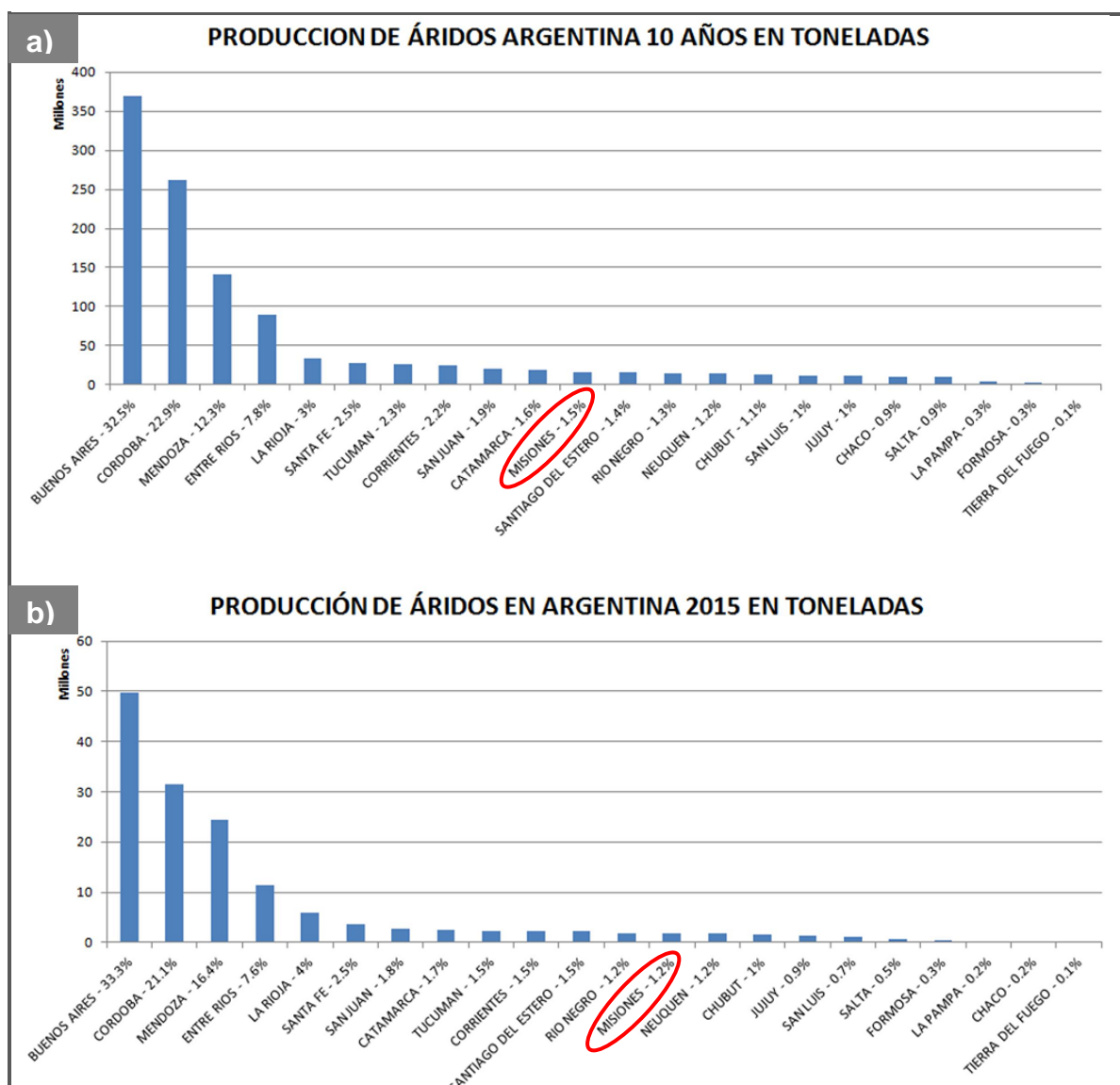


Figura 4.11: Producción de áridos en Argentina por provincia. a) Producción de áridos (expresada en Tn) durante el período 2005-2015. b) Producción de áridos (expresada en Tn) durante el año 2015. Ambos gráficos fueron tomados de Fontana *et al.* (2016) y modificados para señalar (en color rojo) la posición que ocupa Misiones en el contexto nacional, según las estadísticas del sector.

Los potenciales impactos de la apertura, explotación y abandono de las canteras de basalto.

Gómez Orea (1999) define el concepto de impacto ambiental como la alteración que introduce una actividad humana en su entorno. Dicha alteración se manifiesta a través de la modificación de alguno de los factores ambientales o del conjunto del sistema ambiental; de la modificación del valor del factor alterado o del sistema ambiental; y de la interpretación o significado ambiental de dichas modificaciones para la salud y el bienestar humano.

La Ley Nacional 24.585/95, de la Protección Ambiental para la Actividad Minera, define al impacto ambiental como *la modificación del ambiente, benéfica o perjudicial, directa o*

indirecta, temporal o permanente, reversible o irreversible, causada por la actividad minera en el área de influencia del proyecto (Art. 4° Normativa Complementaria Presupuestos Mínimos). La citada Ley comprende a las actividades de prospección, exploración, explotación, desarrollo y almacenamiento de sustancias minerales, incluidas todas las acciones destinadas al cierre de las minas. Asimismo, abarca los procesos de trituración, molienda, beneficio y otros, y la disposición de residuos, cualquiera sea su naturaleza (Art. 4°).

Las eventuales modificaciones sobre el suelo, agua, atmósfera, flora, fauna, relieve y ámbito sociocultural, asociadas en general a estas actividades, dependen de la etapa del proyecto y de las operaciones que le son propias. Al ser la minería una actividad extractiva, algunas de las transformaciones físicas que produce tienen carácter irreversible y están dadas, en principio, por la ocupación del espacio que se requiere para la explotación e infraestructura asociada. En este sentido, la ubicación y magnitud de los emprendimientos constituyen factores decisivos en relación con las afectaciones que pueden producirse sobre los factores ambientales y sociales.

La primera actividad que se ejecuta es el destape, que consiste en el retiro del suelo y de los niveles alterados de basalto (*tosca*). Aquí se produce la destrucción de los perfiles edáficos y de la vegetación del sector. Se trata de modificaciones irreversibles cuya magnitud dependerá de los volúmenes a remover, y del tipo de suelo y vegetación que resulten afectados. En general, por una cuestión económica, se busca que el destape sea el mínimo posible (por ejemplo, en ubicaciones con suelos 6 A o 4 de la clasificación de CARTA 1964). Con respecto a la vegetación, si bien su destrucción es permanente, es posible compensar este impacto, por ejemplo, con la incorporación de programas de reforestación en el plan de manejo ambiental.

La siguiente tarea es la extracción del material a través de la formación de bancos, para lo cual se realizan perforaciones y voladuras. Estas actividades producen alteraciones sobre el aire (ruidos y polvos) que resultarán significativas en términos de contaminación, según la localización de la cantera. Si la explotación está emplazada fuera de áreas urbanas o periurbanas, con población ausente o muy escasa, y además se encuentra convenientemente alejada de áreas naturales protegidas o importantes para la conservación, las modificaciones que se produzcan serán asimiladas por el medio, dado su carácter temporal y reversible. No obstante, es importante prever medidas de protección adecuadas para los operarios que sí estarán expuestos a estas alteraciones. Con respecto al uso de explosivos, la utilización de cargas apropiadas y el empleo de detonadores eléctricos y microretardos, son algunas de las medidas recomendadas para disminuir las vibraciones y mejorar los resultados de las voladuras. Asimismo, el recubrimiento de los cordones detonantes expuestos al aire, y la disminución al máximo de las operaciones de reducción de roca volada (con tamaños por encima de los admitidos por las trituradoras primarias, por ej. 0,60 m), son otras de las prácticas que habitualmente se recomiendan para mitigar molestias y daños. La altura de los bancos también es un aspecto importante en relación con las alteraciones al drenaje superficial y, especialmente, con los cambios visuales y paisajísticos que estos pueden provocar. Si bien se sostiene que con bancos elevados (entre

10 y 20 m) se obtienen mejores rendimientos en la perforación, con los explosivos, en el uso de los equipos y en la infraestructura de accesos, las menores alturas también tienen ventajas a considerar. Entre ellas se destacan las mejoras que se pueden lograr en las condiciones de seguridad, la necesidad de utilizar menores cargas- lo que implica reducir las vibraciones y la onda aérea- y las condiciones más favorables para la restauración y tratamiento de taludes al finalizar la explotación (Bustillo Revuelta *et al.* 2014).

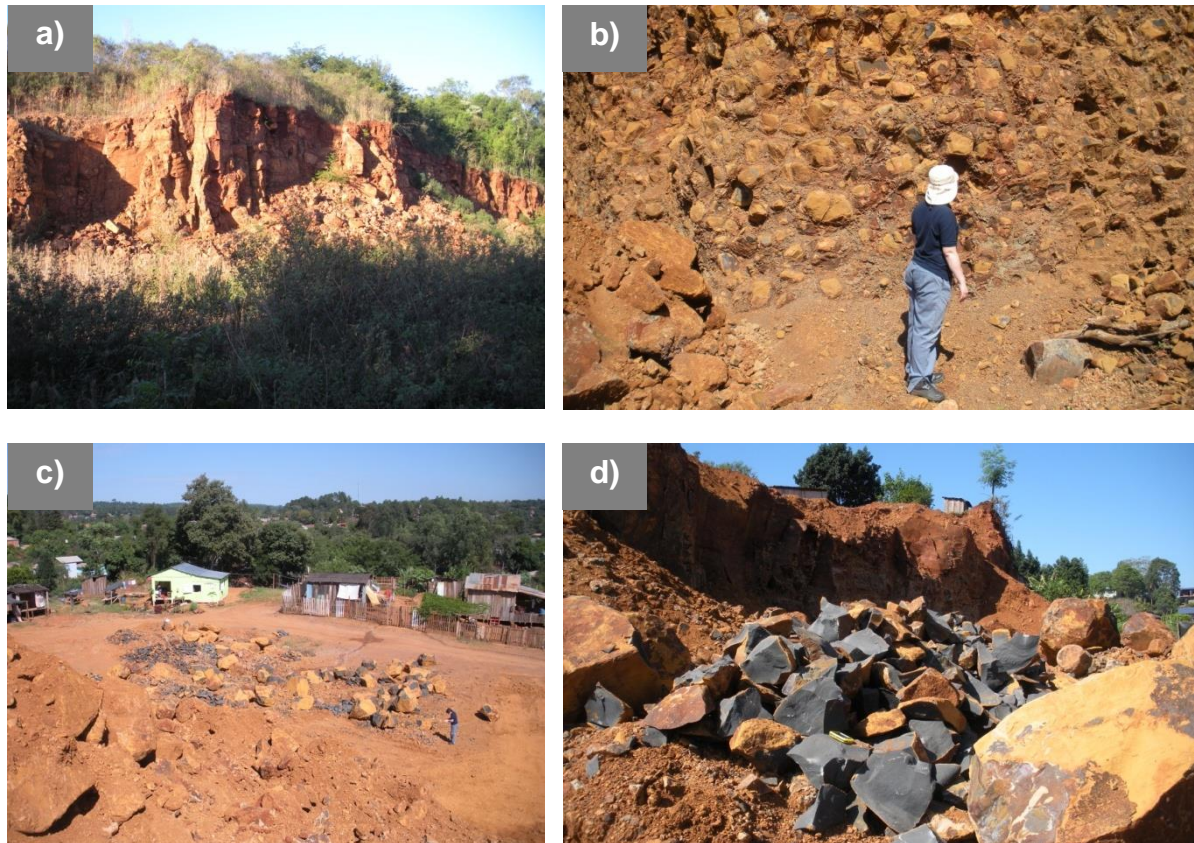


Figura 4.12: Explotaciones de *tosca* (basalto alterado). a) Frente de extracción de *tosca*. b) Detalle de la meteorización catafilar del basalto con los típicos *bochones* de *tosca*. c) Proceso de ocupación (viviendas) en una explotación informal. d) Roca basáltica volada para la producción artesanal de adoquines para empedrados. En general, se trata de trabajos informales y realizados en condiciones precarias.

La carga y el transporte del material volado hasta la planta de trituración se realiza utilizando excavadoras frontales y camiones volcadores. La utilización de equipos pesados y otros vehículos, genera la emisión de gases por la combustión de motores. Asimismo, la circulación interna, especialmente de camiones, produce polvo en suspensión que, en exceso, puede ser un riesgo para la salud de los trabajadores, tener efectos sobre el crecimiento de las plantas (dificulta la fotosíntesis), alterar la calidad del paisaje y producir molestias a la población cercana, entre otros (Martínez y Gutiérrez 2014). Algunas medidas para reducir estos efectos son, por ejemplo, el mantenimiento periódico de máquinas y vehículos, el riego de los sitios de tránsito, el retiro del material fino depositado sobre las vías de circulación (polvo), la reducción de la velocidad del transporte de carga, y la utilización obligatoria de máscaras de protección por parte del personal. En las plantas de tratamiento también existe emisión de polvos y ruidos. Como el proceso de trituración y clasificación se realiza por vía seca, las emisiones de material particulado pueden ser importantes, si no se incorporan sistemas de captación.

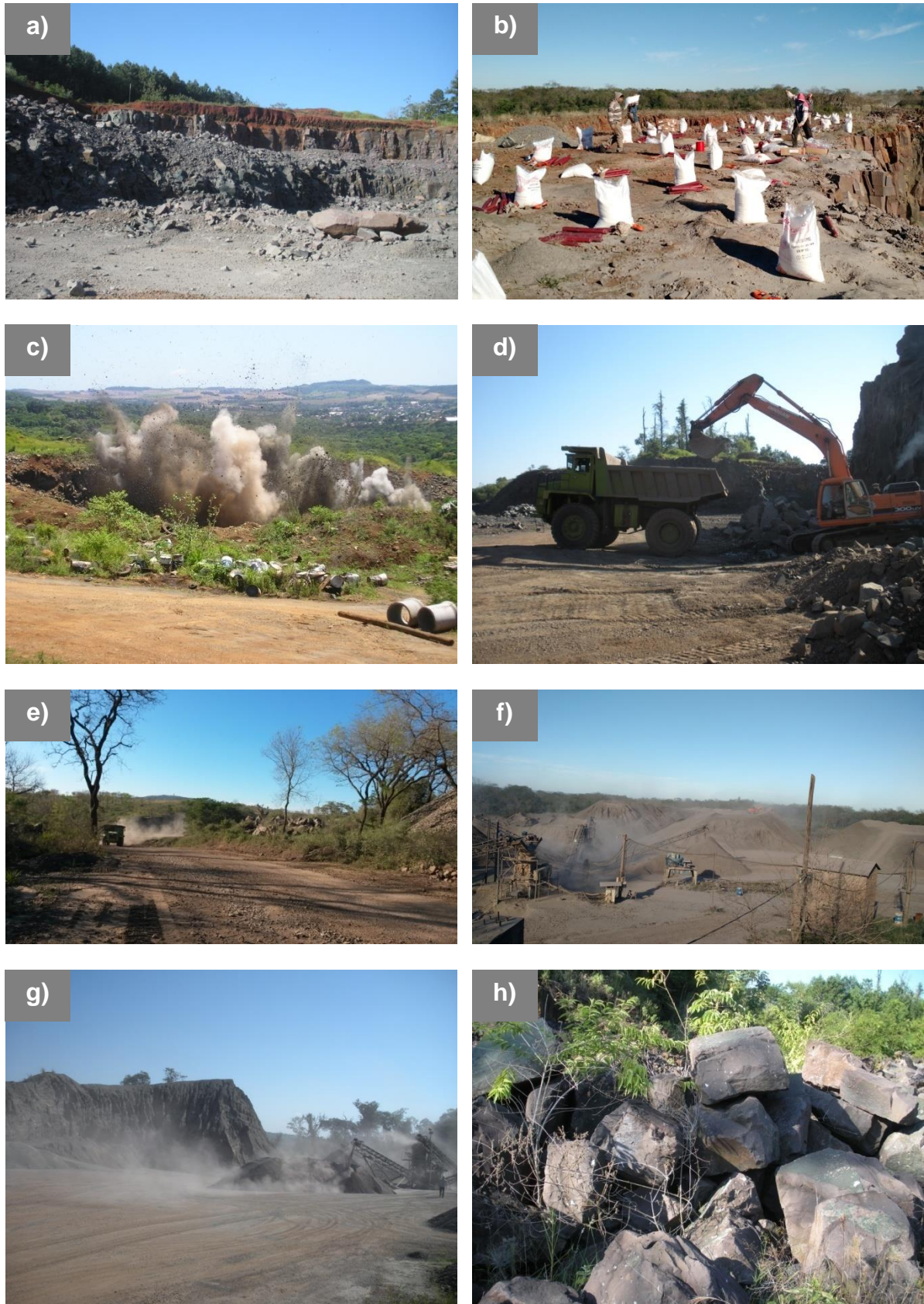


Figura 4.13: Actividades que se desarrollan durante la explotación de canteras basálticas. a) Conformación de bancos y destape (suelo colorado). b) Carga con explosivos para la ejecución de una voladura. c) Voladura en una cantera vial. d) Excavadora frontal cargando el material volado sobre un camión volcador. e) Polvo generado por el tránsito de camiones dentro de la explotación. f) Planta de trituración y clasificación. g) Acopio de material triturado, donde se puede observar (izquierda) la altura de la fracción 0-6 acumulada en una planta de producción para hormigón. h) Material de descarte (basalto alveolar) apto para rellenos en la etapa de cierre.

Fueyo Casado (2014) divide las técnicas para reducir el polvo generado en las plantas de tratamiento de áridos en dos tipos de sistemas: de captación por aspiración y de supresión de polvo por pulverización. Este autor cita para el primer caso, separadores por gravedad e inercia (cámaras de laberintos, ciclones y multiciclones), filtros de mangas, captadores por vía húmeda (*scrubbers*) y captadores electrostáticos. En el segundo caso, menciona los sistemas por pulverización mediante equipos fijos y mediante equipos móviles. A nivel local y en general, estas prácticas no se ven incorporadas en los establecimientos, ya sea por los costos adicionales que implican y/o por la falta de experiencia que existe en la instalación y uso de estos equipamientos. La recuperación del polvo generado en las plantas de trituración, como un subproducto para otras aplicaciones, podría combinar el cuidado ambiental con los beneficios de un aprovechamiento integral de este recurso.

La contaminación del suelo, del agua superficial y subterránea, debido a vertidos cloacales, de combustibles, aceites, y otros, así como las afectaciones que se pueden producir, según la ubicación y tamaño de la cantera, sobre la fauna (migración, atropellamientos, cacería ilegal) y la flora (destrucción directa, aumento del riesgo de incendio), también constituyen potenciales impactos que deben ser evaluados junto con los inherentes al ámbito sociocultural.

Con respecto a la etapa de cierre y abandono de las canteras de basalto, sobresale el hecho de que los pasivos ambientales generados por esta actividad son bastante habituales en la provincia (Figura 4.14), especialmente los viales, cuya restauración ambiental ahora cuenta con una guía metodológica, elaborada por técnicos de la Dirección Nacional de Vialidad (Somenson 2014), la cual bien podría ser aplicada en la jurisdicción provincial.



Figura 4.14: Canteras abandonadas con distintas situaciones de cierre. a) Cantera anegada ubicada en un medio rural. b) Cantera vial anegada (pasivo ambiental) ubicada sobre una ruta pavimentada. c) Cantera comercial anegada y próxima a un barrio de viviendas que fue construido posteriormente. d) Restauración paisajística de una antigua cantera que fue incorporada a los espacios verdes de la ciudad de Posadas.

Restricciones o limitantes identificadas para la minería del basalto en el área de estudio.

Al integrar, en una primera aproximación, la información geológica (Capítulo 2) con las características ambientales y socioeconómicas, se evidencia que el área de estudio es una zona productiva y con condiciones favorables para el desarrollo de la minería del basalto. No obstante, su potencial expansión se encuentra condicionada -en ciertas áreas- por la normativa ambiental vigente y por el posible crecimiento en extensión de las áreas urbanas, especialmente de la ciudad de Eldorado.

Si bien el basalto es un recurso relativamente común y abundante en la zona, existen sectores que presentan ciertas ventajas desde el punto de vista de la explotación. En este sentido, un factor a evaluar es el espesor de los suelos (destape). La mayor parte de la superficie presenta suelos 9 (tierras coloradas profundas), caracterizados por tener los perfiles más desarrollados (siempre >1 m) y ser netamente agrícolas. Los yacimientos cubiertos con suelos de menor espesor (6A y 6B) se localizan próximos a los cursos de agua y en las partes más altas del relieve (sector este). Los primeros emprendimientos mineros y el más importante en la actualidad, están ubicados precisamente sobre unidades 6A, o en los límites entre los 6B y 9.

Los suelos más delgados, particularmente los 6B, se localizan en sitios con fuertes pendientes, por lo que su única aptitud es la conservación del monte nativo. Los bosques que se conservan sobre estos suelos no pueden ser desmontados debido a que se encuentran protegidos por la Ley Provincial XVI N° 105. Esta Ley –vigente desde el año 2010- introdujo importantes restricciones que deben ser consideradas al estudiar la localización de nuevos proyectos. Dicha normativa clasifica a los montes nativos según las categorías I, II y III. La primera es la de mayor jerarquía para la conservación y comprende, en la zona de estudio, un pequeño sector ocupado por el Parque Natural Municipal Salto Küppers (64 ha). La segunda, contiene a los bosques protectores de algunos arroyos y a los remanentes ubicados en lugares con pendientes pronunciadas y suelos 6B. En ambos casos el desmonte está prohibido. Sólo es posible convertir las superficies identificadas con la categoría III, las cuales corresponden a bosques secundarios, bosques rurales y áreas con bosques degradados en tierras agropecuarias. La Figura 4.9-a muestra la distribución de estas categorías en el área de estudio.

Los aspectos demográficos y sociales revisados previamente mostraron que la zona de estudio se encuentra en uno de los departamentos más importantes de Misiones, cuya población se asienta principalmente en la ciudad de Eldorado. La ubicación estratégica de esta zona, las actividades productivas que en ella se desarrollan y la potencial ejecución de algunos proyectos en evaluación, como por ejemplo, la construcción del Puente Eldorado – Mayor Otaño (Paraguay), o los aprovechamientos hidroeléctricos de las cuencas de los arroyos Piray Guazú y Piray Miní, llevan a suponer que Eldorado podría experimentar un importante crecimiento urbano. Si dicho crecimiento se realiza a través de una expansión urbana, puede ocurrir, como en otros lugares, que los establecimientos mineros, ubicados originalmente en áreas rurales, terminen próximos a nuevas zonas de uso residencial. Se señala este riesgo, debido a que las políticas actuales –a nivel provincial y municipal- por

el momento no están considerando a la actividad minera dentro de los temas de ordenamiento territorial.

Otro aspecto importante a considerar en las etapas iniciales de la prospección, es el territorio Mbya Guaraní identificado a través del relevamiento territorial indígena (Ley Nacional 26.160/06). Las comunidades asentadas en la parte norte del área (municipio de Colonia Delicia) cuentan con el reconocimiento de sus derechos para la posesión y uso pacífico de 523 ha.

Dado el nivel preliminar de este análisis, basado en información secundaria y en la normativa vigente, algunos aspectos tales como las afectaciones al patrimonio cultural (restos arqueológicos) o los usos turísticos y paisajísticos de la zona, quedaron sin considerar pero se destaca su importancia.

En general, la búsqueda de yacimientos basálticos no suele incluir oportunamente consideraciones de este tipo en la toma de decisiones. Sí es habitual que los esfuerzos estén centrados en resolver aspectos relacionados con la propiedad de los terrenos, con la verificación preliminar de los parámetros de calidad requeridos, las distancias de transporte, los espesores de destape, entre otros. No obstante, la pertinente incorporación de estos y otros criterios similares podría ayudar a prevenir daños ambientales, conflictos y eventuales consecuencias indeseables para la actividad.

CAPÍTULO 5

Consideraciones Generales y Conclusiones

CAPÍTULO 5

Consideraciones Generales y Conclusiones

Aspectos geológicos

Marco regional

Los basaltos de Serra Geral son un componente muy importante de la geología de la provincia de Misiones, ya que constituyen la base de la mayor parte de su geografía y son su principal recurso minero para la producción de áridos destinados a la construcción.

Desde el punto de vista científico, estas rocas todavía están poco estudiadas en Argentina en comparación con los trabajos desarrollados fundamentalmente en Brasil, a través de proyectos de cooperación internacional y otros de universidades y centros de investigación.

El conocimiento actual del magmatismo de Serra Geral abarca numerosos aspectos, algunos de los cuales fueron revisados en el Capítulo 2 de este trabajo. Denominadas últimamente en Brasil como Grupo Serra Geral (Wildner *et al.* 2007, MINEROPAR 2013), estas rocas componen la Provincia Ígnea Continental Paraná-Etendeka, ubicada en el centro este de Sudamérica (917.000 km²) y en el noroeste de África (80.000 km²). Si bien, los estudios geocronológicos muestran discrepancias en relación con la duración del magmatismo, en general se acepta que la actividad volcánica principal tuvo lugar durante el Cretácico inferior, entre los 134 y 129 Ma (Peate 1997). El origen de este volcanismo se explica a través de diferentes modelos que postulan la actividad de plumas mantélicas (activas o pasivas), así como también la ocurrencia de procesos relacionados con subducción y aislamiento térmico. Por ejemplo, Vizán y Lagorio (2011), a partir de estudios realizados en Misiones y de datos publicados para la provincia de Paraná, proponen un modelo que atribuye la génesis de estos derrames a procesos de convección lateral de gran escala, inducida por subducción y por el entrampamiento térmico de una enorme cantidad de calor almacenado a expensas del supercontinente Pangea. Si bien estos autores reconocen la intervención de una pluma, sugieren que ésta no se habría generado en el límite manto-núcleo y que sólo habría funcionado como un conducto de escape magmático. La fuente de estos flujos basálticos también ha sido motivo de debate entre quienes proponen un origen litosférico y los que consideran algún tipo de participación astenosférica. En términos generales, el magmatismo de Serra Geral ha sido descripto como bimodal, compuesto fundamentalmente por rocas básicas predominantes y ácidas subordinadas, junto con enjambres de diques y filones capa (sills) concentrados en la región oriental de la provincia (costa de Brasil, entre Santos y Río de Janeiro). De acuerdo a la composición de elementos mayoritarios, prevalecen los basaltos tholeíticos acompañados, en menor medida, por andesitas basálticas y por riolitas. Consideradas durante mucho tiempo como monótonas sucesiones de coladas basálticas, estas rocas han revelado importantes variaciones, sobre todo a partir de los estudios geoquímicos desarrollados desde 1980 en adelante. Inicialmente los derrames de Serra

Geral fueron discriminados en dos tipos: los de bajo Ti, predominantes en el sur de la provincia volcánica (CPS), y los de alto Ti, más abundantes en el norte (CPN). Ambos fueron reconocidos en el sector intermedio de la provincia (CPC). Estudios posteriores, si bien mantuvieron esta división, sumaron otros criterios geoquímicos para la clasificación, basados en razones de elementos con comportamiento relativamente inmóvil (Ti, Zr, Y, y otros) y en características isotópicas. Así, Peate *et al.* (1992) definieron seis magmas tipo que fueron reunidos en dos grupos denominados como de alto-Ti/Y (Urubici, Pitanga, Paranapanema, Ribeira) y de bajo-Ti/Y (Gramado y Esmeralda). También la geología física de la provincia ígnea Paraná ha sido objeto de estudio en los últimos años. Los trabajos iniciados por Waichel *et al.* (2006) indican que la mayoría de los derrames son de tipo pahoehoe y, en menor medida, de tipo aa. Los estudios efectuados en este campo revelan asimismo que el emplazamiento de este magmatismo todavía se encuentra poco comprendido y que definitivamente no constituye un simple apilamiento de coladas con geometría tabular.

En comparación con otras grandes provincias ígneas, como por ejemplo, Columbia River, Deccan y los Traps de Siberia, la estratigrafía de este enorme paquete de derrames, geoquímicamente distintos y emplazados posiblemente de manera diacrónica, todavía no cuenta con divisiones estratigráficas y herramientas de correlación regional, definidas para toda su extensión. No obstante, durante la última década ha habido algunas propuestas, principalmente a partir de la integración de investigaciones previas con los trabajos realizados por el Servicio Geológico de Brasil, en los estados limítrofes de Paraná, Rio Grande do Sul y Santa Catarina. Wildner *et al.* (2007) identificaron 16 unidades de flujo que fueron definidas como formaciones dentro del Grupo Serra Geral. Posteriormente, el Servicio Geológico del Estado de Paraná asignó al redefinido Grupo Serra Geral cuatro formaciones y 13 miembros que fueron distinguidos a partir del mapeo -a escala 1:250.000- de las cartas geológicas Guaíra, Cascavel, Campo Mourão, Foz do Iguaçu, Guaraniaçu, Guarapuava, Pato Branco y Clevelândia. Cabe mencionar al respecto que las definiciones dadas en el estado de Paraná, son el resultado de la aplicación de una metodología denominada *análisis de arquitectura faciológica*, la cual es presentada como una alternativa superadora en relación con los métodos de mapeo previamente utilizados (MINEROPAR 2013).

Con respecto a los trabajos realizados sobre volcanismo de Serra Geral en la provincia de Misiones, los principales antecedentes disponibles se pueden considerar haciendo una distinción entre los aportes pioneros y los estudios efectuados a partir de los conocimientos surgidos en las últimas décadas. Dentro de los primeros, se considera muy importante el trabajo de Teruggi (1955), que examinó las rocas basálticas de Misiones y las ubicó dentro de la asociación de basaltos tholeíticos de Turner y Verhoogen (1951) y, específicamente dentro de una gran provincia petrográfica que propuso denominar cuenca del Paraná (Teruggi 1955, p. 260). Por otra parte, el estudio pionero de C.A.R.T.A. (1964) tiene el mérito de ser, hasta ahora, el único relevamiento geológico realizado para toda la provincia de Misiones. Si bien hoy el bosquejo estratigráfico propuesto en dicho trabajo nos resulta simple y las unidades definidas inapropiadas para realizar correlaciones locales y

regionales, el mismo tiene el valor de proporcionar, entre otros, aproximaciones muy útiles en relación con la búsqueda de cambios y contactos litológicos, sobre todo al iniciar trabajos de campo. Cabe recordar al respecto que la distinción de las unidades de C.A.R.T.A. (1964) fue realizada básicamente a través de medios de fotointerpretación y de correlaciones geométricas efectuadas a partir de las diferencias morfológicas identificadas entre los derrames más espesos y duros y, los niveles vesículo-amigdalares, menos resistentes a la erosión.

Por otra parte, las contribuciones de los últimos años, aportaron principalmente nuevos datos geoquímicos y algunas mediciones paleomagnéticas (Lagorio y Leal 2005a, Mena *et al.* 2006, Lagorio y Vizán 2011). Los resultados presentados en estos estudios muestran que en Misiones se daría la coexistencia de todos los tipos geoquímicos reconocidos por Peate *et al.* 1992. Asimismo, se destacan los aportes sobre aspectos geodinámicos de Lagorio y Vizán (2011) y Vizán y Lagorio (2011), quienes apoyados fundamentalmente en estudios geoquímicos y petrogenéticos, proponen un modelo para explicar la génesis del magmatismo de Serra Geral, el cual vinculan, a su vez, con el volcanismo alcalino de la provincia de Córdoba.

Caracterización geológica del área de Eldorado

La caracterización geológica realizada en este trabajo tuvo el propósito de ampliar el conocimiento de la geología de la zona de estudio, especialmente de las coladas basálticas expuestas en el área de Eldorado. Para ello se procuró utilizar la información proporcionada por CARTA (1964), en relación con las coladas aflorantes y aplicar, dentro de los objetivos de esta tesis, los nuevos enfoques dados para el volcanismo de Serra Geral. Las tareas realizadas incluyeron relevamientos de campo, toma de muestras, descripciones de cortes delgados y pulidos, y análisis químicos de elementos mayoritarios y traza.

El trabajo de campo permitió describir niveles-vesículo amigdalares, brechas basálticas y basaltos masivos; y comparar los contactos identificados con los antecedentes cartográficos. Así, se reconocieron coincidencias parciales con tres de las cuatro unidades mapeadas por C.A.R.T.A. (1:50.000), denominadas $\beta 1$, $\beta 2$ y $\beta 3$, las que no deben interpretarse como coladas individuales, sino como unidades morfológicas que pueden incluir más de un derrame. Si bien durante los relevamientos fueron observadas características asimilables a procesos de flujo e inflación, el alcance de este trabajo no permitió concluir sobre la forma de colocación y extensión lateral de las coladas aflorantes en la zona.

Todas las muestras analizadas fueron clasificadas como basaltos tholeíticos, salvo una que corresponde a un dique andesítico basáltico. De acuerdo a la clasificación de magmas tipo pertenecen al grupo de alto Ti/Y (>310), conformado por los magmas Urubici, Pitanga, Paranapanema y Ribeira. Los tipos Gramado y Esmeralda (bajo Ti/Y) no fueron hallados en el muestreo realizado. La aplicación de otros criterios dados por la clasificación (contenidos de TiO_2 , Sr, y Zr/Y), permitió reconocer diferencias entre los basaltos aflorantes en los frentes PE 1 a PE 4 (sector centro-oeste de la zona) y los expuestos en PE-5 y PE-6 (borde este de la zona). En el primer caso, las muestras son compatibles con el

tipo Paranapanema y en el segundo, con la variedad Ribeira. Estos resultados coinciden con los datos publicados en trabajos sobre la cuenca del Paraná (Peate *et al.* 1992) y para el norte de la provincia de Misiones (transecta Eldorado–Bernardo de Irigoyen). En dichos trabajos, las variedades Paranapanema y Ribeira son mencionadas como las más jóvenes de la secuencia (Lagorio y Leal 2005 y Mena *et al.* 2006). No obstante, si bien inicialmente los magmas tipo fueron tratados como unidades cronoestratigráficas (Peate *et al.* 1992), evidencias e interpretaciones posteriores llevaron a considerar emplazamientos diacrónicos para estas unidades geoquímicas (Peate 1997). Los últimos avances dados -en Brasil- para la Formación o Grupo Serra Geral, indican que el establecimiento de definiciones estratigráficas locales y correlaciones regionales requiere de una intensa combinación de datos de campo, químicos, petrográficos y geofísicos.

Finalmente, con respecto al interés de establecer la aptitud de uso de las rocas basálticas en aplicaciones cerámicas y otras alternativas (Capítulo 3 de este trabajo), las características mineralógicas y petrográficas, particularmente de los basaltos densos o masivos, mostraron similitudes en cuanto a los minerales primarios y a los rasgos texturales. Las diferencias halladas fueron observadas en la mineralogía secundaria y relacionadas con la posición de las muestras en los derrames (niveles de tope, centro, base) y con el perfil de meteorización. A partir de estas determinaciones, se seleccionó para los ensayos tecnológicos una muestra expuesta en el frente PE-1 (CELD 004), un basalto masivo extraído de la parte media de una colada, de grano fino y textura intergranular. Esta muestra fue considerada representativa de los niveles densos y más frescos colectados en la zona de trabajo.

Usos de las rocas basálticas

Habida cuenta de los usos industriales que tienen los basaltos en otros países y de sus posibilidades para aplicaciones cerámicas y ornamentales y como enmiendas minerales, se considera que el conocimiento sobre la viabilidad de estas aplicaciones alternativas podría resultar de interés para el desarrollo local de aquellas zonas que posean afloramientos de estas rocas. La Figura 5.1 muestra la distribución en el país de Grupos y Formaciones geológicas que involucran basaltos, de distinto tipo y diferentes edades, representados a escala 1:2.500.000, según el Mapa Geológico de la República Argentina (SEGEMAR 1997). Si bien existen afloramientos basálticos en varias provincias, la explotación de estos materiales tiene mayor importancia económica en Misiones, Corrientes, Entre Ríos, Córdoba y San Luis, donde son utilizadas fundamentalmente para la producción de áridos. También se pueden citar los aprovechamientos actuales y potenciales señalados para la Provincia de la Pampa y los que se realizan, en menor medida, en las provincias de Neuquén y Río Negro.

Las aptitudes de los basaltos de la FSG evaluados en el Capítulo 3, para uso cerámico y ornamental, son sólo un ejemplo del potencial que tienen estas rocas para el desarrollo de nuevos y diferentes aprovechamientos.

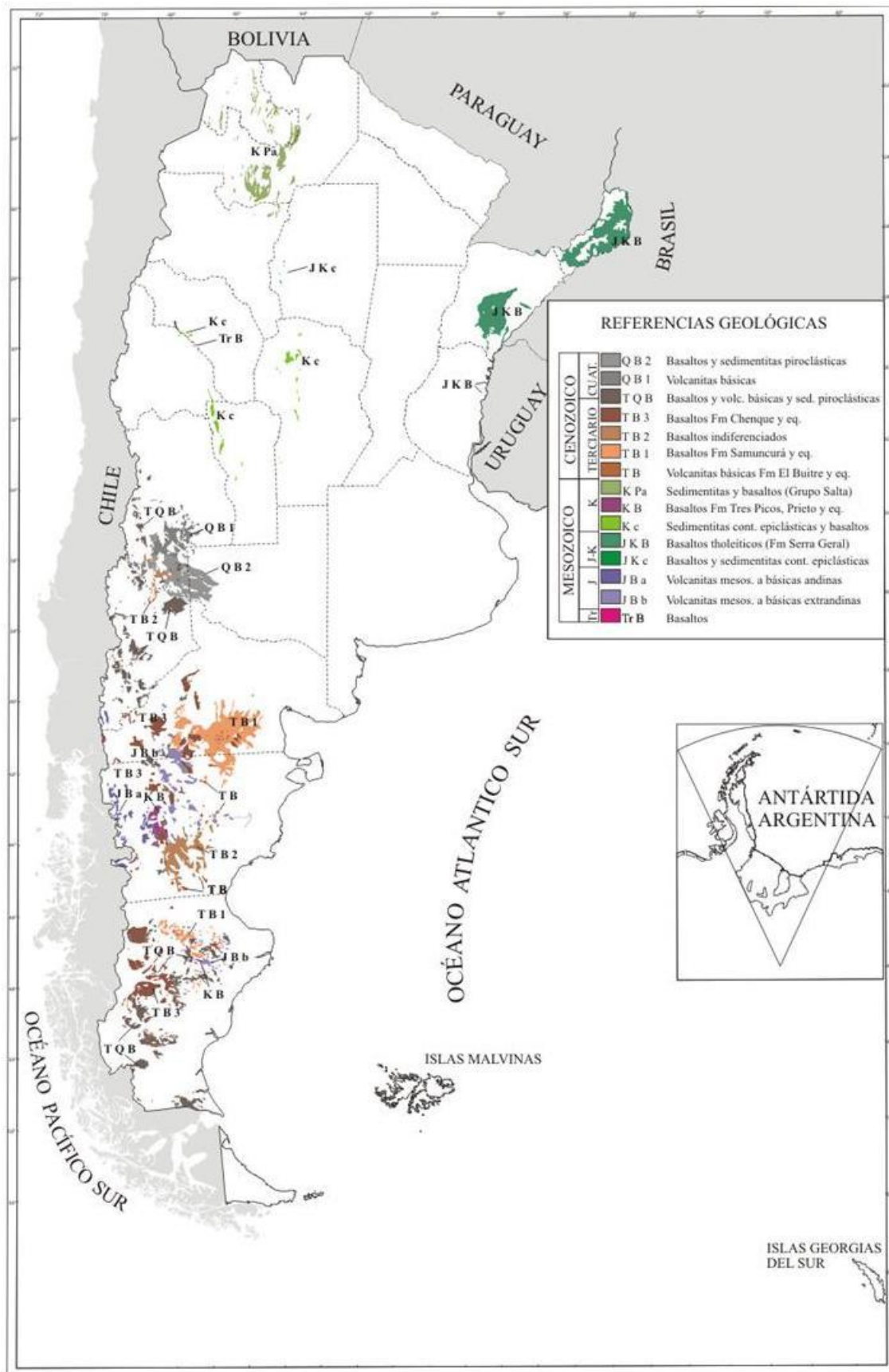


Figura 5.1: Afloramientos de rocas basálticas y volcanitas básicas en la República Argentina. Modificado del Mapa Geológico de la República Argentina (SEGEMAR 1997), Escala 1:2.500.000. El texto de las referencias geológicas fue simplificado para su reproducción.

Aptitudes cerámicas de algunos basaltos de la Formación Serra Geral

El objetivo del estudio fue evaluar la aptitud de algunos basaltos de la FSG para su utilización como materia prima para la fabricación de cerámica roja, como componente no plástico o material de relleno “filler”.

Para ello se utilizaron tres muestras basálticas, una roca (CELD 004) y dos residuos finos colectados en una planta vial (RFT y RFA). Los tres basaltos mostraron una composición química y mineralógica similar. La distribución del tamaño de partículas también fue semejante, no obstante, se determinó que el residuo RFA es un material levemente más fino que los otros dos basaltos. Se observó que la fusión ocurrió aproximadamente a los 1200° C.

Como componentes plásticos se emplearon dos materiales arcillosos locales (SO y SR5), conocidos en la región como “ñau”. Dichos materiales están constituidos principalmente por filosilicatos (esmectita, caolinita y escasos interestratificados de esmectita-illita), con distintos porcentajes de cuarzo y escaso feldespato. La composición química de los mismos coincide con la de otras arcillas rojas utilizadas, con baja alúmina y altos contenidos de sílice, Fe_2O_3 y TiO_2 . La distribución de tamaños de partícula de ambos materiales fue similar, encontrándose diferencias en la naturaleza y contenido de los argilominerales de la fracción arcilla, así como también, en los valores de plasticidad y refractariedad. SR5 presentó el mayor índice de plasticidad, lo cual se explica por el alto porcentaje de argilominerales encontrado en la muestra total y por la composición de la fracción arcilla conformada mayoritariamente por esmectita y minerales expansibles. Por otra parte, SO mostró la mayor refractariedad, lo cual se atribuye a la presencia de caolinita y al menor contenido de óxidos fundentes (Fe_2O_3 , K_2O y Na_2O). Se comprobó que a distintas temperaturas de calcinación (entre 900 y 1100° C), ambos materiales arcillosos - utilizados como único componente- presentan características cerámicas muy diferentes. En particular, se estableció que a bajas temperaturas (900-950° C), el grado de vitrificación es mayor para SR5 que para SO.

El efecto de la adición de basalto en los productos secos a 100° C, mostró que la densidad de las piezas preparadas con SO aumentó linealmente con el porcentaje de basalto, en coincidencia con la densidad teórica calculada para las distintas composiciones. A su vez, la densidad relativa se mantuvo aproximadamente constante e indicó que la porosidad de los diferentes productos fue similar. La densidad de las piezas con SR5 tuvo un leve incremento con la adición de 40% de basalto y luego disminuyó. Se observó que para las mezclas con SR5 la densidad aparente depende de la composición y de la porosidad. Se comprobó que la incorporación de basalto modificó la distribución granulométrica de las diferentes formulaciones, según un patrón bimodal, aumentando el tamaño promedio de partícula d_{50} y reduciendo significativamente el contenido de la fracción $<2 \mu\text{m}$. Las composiciones con SR5 resultaron más finas y con un empaquetamiento inicial más eficiente (con 40% de basalto) el cual se atribuye a la mencionada distribución bimodal. La contracción lineal por secado de los productos preparados con SO y SR5 también mostró diferencias. Las mezclas con SR5 tuvieron mayor contracción lo cual se explica por la presencia de minerales expansivos. A su vez, el menor valor observado en las piezas con

abundante basalto se relaciona con el cambio de la composición (menos contenido de arcilla y de minerales expansivos) y con la distribución granulométrica de las partículas (menor contenido de finos). Los productos secos preparados con SR5 (arcilla más plástica) tuvieron valores más altos de resistencia mecánica. Para ambos materiales se observó una disminución del MOR a partir del 40% de basalto adicionado, es decir al disminuir la proporción de arcilla en la mezcla.

En cuanto al efecto de la adición de basalto sobre las propiedades cerámicas de las piezas calcinadas, dependió de la temperatura de sinterizado. Los productos calcinados a 900° C presentaron la densidad y contracción más bajas, evidenciando que el proceso de vitrificación estaba en su etapa inicial. De hecho se comprobó para mezclas con ambos materiales arcillosos, que la porosidad resultó elevada y casi independiente de la adición de basalto. Entre 900-1000° C ocurrió un considerable avance del proceso de vitrificación. Las composiciones ricas en SR5 mostraron baja porosidad (12%, densos) a 950° C, en tanto que fue del 25-27% para el material compuesto con similar contenido de SO, el cual requirió la aplicación de temperaturas superiores a 1050° C para alcanzar una porosidad equivalente. El aumento de la temperatura de sinterizado a 1100° C causó un incremento de la densidad coincidente con la disminución de la porosidad. Comparativamente el aumento de la densidad fue mayor para las composiciones con SO que para SR5. Con este último material, la máxima densidad se alcanzó a los 950° C. En general se observó que el avance de la vitrificación con la temperatura favoreció la densificación de los cerámicos con un cierto contenido de basalto. Para composiciones con contenidos superiores, el efecto de la elevada temperatura no produjo un aumento apreciable de la vitrificación y consecuentemente no se llegó a compensar la mayor porosidad. En particular para la adición de 80% de basalto, la porosidad apenas se redujo o fue similar con respecto a la de 1000° C. Esto se asocia a la distribución del tamaño de partícula más gruesa que resulta difícil de sinterizar y a la menor vitrificación relacionada con el bajo contenido de arcilla. Para ambas composiciones (con SO y SR5) se observó que la resistencia mecánica, medida a través del MOR, aumentó con la temperatura de sinterización. Este efecto fue levemente menor en los materiales con alto contenido de basalto y se relaciona directamente con la mayor porosidad y/o la menor cohesión entre partículas.

Las composiciones con los residuos recuperados (RFT y RFA) originaron cerámicos con características similares y que no difieren significativamente de los materiales obtenidos con el basalto molido. El efecto del tratamiento térmico en la evolución de sus propiedades fue menor a elevados contenidos de basalto. A su vez se estableció que la composición y granulometría de ambos residuos son adecuadas para sustituir al basalto CELD 004 en las diferentes formulaciones resultando una materia prima de interés para la industria cerámica.

Los resultados obtenidos muestran que las características de las piezas cerámicas preparadas con SO y SR5 mejoraron con la adición controlada de basalto, habiéndose establecido un contenido adecuado (40-60%) para una condición de sinterización de 950-1000° C, usual en la fabricación de cerámica roja estructural, y que ciertamente dependerá del material arcilloso utilizado.

Aptitudes ornamentales de algunos basaltos de la Formación Serra Geral

Son varios los factores que se deben considerar para evaluar las posibilidades ornamentales de una roca. Para ello, son importantes la naturaleza del material (petrografía, propiedades físicas, alteraciones, comportamiento mecánico, durabilidad, etc.); las dimensiones y formas de los bloques que pueden ser obtenidos; la tecnología, métodos de extracción y de procesamiento disponibles; la infraestructura y la viabilidad ambiental de las explotaciones; y esencialmente, la valoración estética que se haga del material y las oportunidades comerciales que presente el mercado.

El nivel de caracterización alcanzado en este trabajo permitió establecer que los basaltos estudiados tienen rangos de absorción y porosidad aceptables; buenos valores de resistencia a la compresión y a la flexión; así como también, resistencia al ataque de los agentes químicos probados. No obstante, los valores obtenidos de resistencia a la abrasión se consideran relativamente bajos para, por ejemplo, revestimientos de pisos. Las propiedades mecánicas del basalto Eldorado indican mejores aptitudes que el Oberá, lo que se atribuye a las diferencias texturales y mineralógicas que presentan estas rocas. Se considera que ambas variedades poseen cualidades estéticas aceptables.

Si bien estas rocas son utilizadas actualmente en revestimientos rústicos de fachadas e interiores, no tienen el uso ornamental de otros materiales volcánicos. No obstante, con la aplicación de las metodologías y tecnologías adecuadas para su explotación y, fundamentalmente, con el diseño de productos adaptados a sus posibilidades de procesamiento, estas rocas podrían tener novedosas oportunidades en el campo ornamental.

Aspectos ambientales

Se realizó una caracterización ambiental de la zona de estudio con el objetivo de contextualizar a la minería del basalto en relación con el medio en el cual se desarrolla, considerando sus principales impactos así como también las restricciones o limitaciones dadas por la normativa vigente.

Muchas de las alteraciones asociadas a esta actividad pueden ser mitigadas a través de la implementación de buenos programas de gestión ambiental. No obstante, como todo aprovechamiento extractivo, su desarrollo implica ciertas modificaciones que son permanentes e irreversibles. La ubicación y magnitud de las explotaciones constituyen factores decisivos en relación con las afectaciones que pueden producirse sobre los componentes ambientales y sociales del entorno. Para lograr aprovechamientos acordes a las políticas de conservación ambiental promovidas en Misiones y en armonía con los procesos de crecimiento y urbanización de los centros poblados, es imperioso que desde la gestión estatal se incorpore a la actividad minera en la elaboración de los planes de ordenamiento territorial. La tendencia actual hace prever mayores demandas de protección ambiental que en el futuro podrían llegar a condicionar y a perjudicar el progreso de esta actividad, indispensable y estrechamente ligada al desarrollo de la infraestructura de la provincia.

Conclusiones

Sobre la base de lo expuesto en los diferentes capítulos del presente trabajo de tesis doctoral, se concluye lo siguiente:

- 1) Las rocas estudiadas en la zona de Eldorado se clasifican como basaltos tholeíuticos, y raramente en el campo de las andesitas basálticas. Presentan valores de $Ti/Y > 310$, o en algún caso se encuentran levemente por debajo de este límite. Los datos geoquímicos obtenidos en este trabajo indican que son compatibles con los litotipos Paranapanema (titanio intermedio) y Ribeira (bajo titanio). El primero corresponde a los basaltos muestreados en el sector centro-oeste de la zona, mientras que el segundo fue reconocido en los afloramientos expuestos en el borde este de la misma.
- 2) De acuerdo a los estudios petrográficos, mineralógicos y tecnológicos realizados, los niveles densos o masivos identificados en la zona de estudio son factibles de ser utilizados en las aplicaciones tradicionales (producción de áridos) y en otras alternativas, a saber:
 - a) Como materia prima para la elaboración de cerámica roja. Se estableció la aptitud del basalto para disminuir la excesiva plasticidad de las pastas preparadas con arcillas locales (ñau), mejorando la contracción de los productos sin perjudicar la resistencia mecánica de los mismos. Se determinó un contenido adecuado de 40-60% para una condición de sinterización de 950-1000° C, usual en la fabricación de cerámica roja estructural, y que ciertamente dependerá del material arcilloso utilizado. Asimismo, el empleo de residuos basálticos recuperados de una planta de trituración de áridos, produjo resultados similares por lo que también se consideran aptos para esta aplicación. El aprovechamiento de estos residuos podría redundar en beneficios económicos y ambientales.
 - b) Como rocas ornamentales. Los ensayos básicos efectuados sobre muestras procedentes de Eldorado y Oberá, permiten concluir que es factible la utilización de basaltos que se localizan en diferentes sectores de la zona de estudio (Eldorado), especialmente para revestimientos de paredes y fachadas. Sin embargo, se deberán profundizar los estudios y ensayos industriales, con la aplicación de tecnologías modernas, para el mejor aprovechamiento de bloques a los efectos de lograr un producto adecuado, con un acabado superficial acorde a las características físicas y estéticas del material, y con posibilidades comerciales de mayor trascendencia a nivel regional o nacional.
 - c) Como materia prima para la elaboración de vidriados y esmaltes, en la industria vitrocerámica y como enmiendas minerales. Si bien en este trabajo no se realizaron ensayos específicos, resultados de otros estudios indican que las características químicas y mineralógicas de estas rocas son

adecuadas para la elaboración de esmaltes y podrían ser utilizadas para el mejoramiento de suelos a través de enmiendas minerales, tal como sucede en Brasil. Con respecto a las aptitudes de los basaltos de la región como material petrárgico (fabricación de productos por fusión y moldeo de basaltos, y obtención de fibra de basalto o lana de lava) su potencialidad a escala industrial todavía debe ser evaluada.

- 3) La gestión ambiental de los establecimientos mineros debe mejorar a través de la implementación de algunas medidas, como por ejemplo, recuperación de los residuos basálticos generados en las plantas de trituración, incorporación de programas de reforestación, el diseño e implementación temprana de medidas que contemplen la restauración ambiental, para el cierre o abandono de las explotaciones, evitando así la formación de pasivos ambientales, entre otras.

Las características geológicas, ambientales y socioeconómicas del área de estudio indican que se trata de una zona productiva y con condiciones favorables para el desarrollo de la minería del basalto. Sin embargo, su potencial expansión se encuentra condicionada -en ciertas áreas- por la normativa ambiental vigente y por el posible crecimiento en extensión de las áreas urbanas, especialmente de la ciudad de Eldorado. Por ello, se considera necesario que los futuros planes de ordenamiento territorial contemplen las características de la minería del basalto, no sólo para prevenir los eventuales impactos de las explotaciones, sino también, para proteger el desarrollo de esta importante actividad. Todo ello en beneficio de la actividad minera presente y futura, del cuidado ambiental y la sustentabilidad de las diversas actividades que se desarrollen en el territorio provincial estudiado.

.....
Lic. Susana Elsa Ciccioli

.....
Ing. Liliana B. Garrido
Codirectora

.....
Dr. Isidoro B. A. Schalamuk
Director

BIBLIOGRAFÍA

- Ab'Saber, A. 1956. État actuel des connaissances sur les niveaux d'érosion et les surfaces d'aplanissement au Brésil. En Ruellan, F.: Premier rapport de la Commission pour l'étude des niveaux et les surfaces d'aplanissement autour de l'Atlantique, UGI, 5, Rio de Janeiro.
- Ab'Saber, A. 1970. Provincias geológicas e domínios morfoclimáticos no Brasil. Instituto de Geografia, Universidad de São Paulo, 26 p., São Paulo.
- Anderson, T. 1910. The volcano Mantavanu in Savaii. Geological Society of London Quarterly Journal 66: 621-639.
- Angelelli, V. 1937. Reconocimiento geológico del territorio de Misiones en busca de bauxita. Boletín de Obras Sanitarias de la Nación 2: 1 – 25, Buenos Aires.
- Aranda, D. 1974. Monografía sobre suelos de Misiones. Estación Experimental Agropecuaria Misiones, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Publicación Miscelánea 2, 27 p., Cerro Azul, Misiones.
- Arenhardt, E.H. 2009. Eldorado: de colonia de inmigrantes a un modelo de Ciudad lineal (1919-2008). 1º Edición, 170 p., Misiones.
- Arioli, E.E. 2008. Arquitetura faciológica da sequência vulcânica e significado exploratório das anomalias geoquímicas de Elementos do Grupo da Platina (EGP) e metais associados no Sistema Magmático Serra Geral, Estado do Paraná, Brasil. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná, Sector de Ciências da Terra, Curso de Pós-Graduação em Geologia, 194 p.
- ASTM 2009. C170/C170M-09, Standard Test for Compressive Strength of Dimension Stone. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM 2009. C880/C880M-09, Standard Test for Flexural Strength of Dimension Stone. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- Avid, F.A., Paez, G., Cosentino, J. y Sota, J.D. 2014. La durabilidad de los basaltos de la Mesopotamia en los hormigones de cemento portland. En Fontana Piatti, J., Guerra R., Leggiero, J.A., Patrón Costas, E., Ruggiero, M., Carabajal, A.L., (eds.). Los áridos son mucho más que piedras. 2º Congreso Argentino de Áridos, 1º edición, Cámara de la Piedra de la Provincia de Buenos Aires. Actas 1: 387-394, Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
- Bailey, S.W. 1980. Structure of layer silicates. In: Brindley, G. and Brown, G. (eds.): Crystal structures of clay minerals and their identification. Mineralogical Society, 1-124.

- Bertotto G.W. y Tickyj H. 2008. Aplicaciones potenciales de los basaltos de la Provincia de la Pampa. 17º Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 960-961, San Salvador de Jujuy.
- Bigarella, J., Mousinho, M. y Da Silva, J. 1965. Pediplanos, pedimentos e seus depósitos correlativos no Brasil. Boletim Paranaense de Geografia, 16-17: 117-151, Curitiba.
- Bradley, F. 1989. Cenni sull' analisi geologica delle rocce ornamentali. Technostone S.p.A., 91 p., Carrara Italia.
- Bronde, N.R., Duraswaimi, R.A., Dale G. 2004. A brief comparison between the lava flows from the Deccan Volcanic Province and Columbia – Oregon Flood Basalts: implications for models of flood basalt emplacement. In Sheth H.C. and Pande K. (eds.) Magmatism in India through time. Proceedings of the Indian Academy of Sciences, Earth and Planetary Sciences, 113: 809-817.
- Burmeister, C. 1899. Memoria sobre el Territorio de Misiones por el naturalista viajero Carlos Burmeister. Ministerio de Agricultura de la República Argentina. Imprenta, Litografía y Encuadernación de J. Peuser, 87 p., Buenos Aires.
- Bustillo Revuelta, M., Durán López, A. y Fueyo Casado, L. 2014. Manual de áridos. Fueyo Editores. 597 p., Madrid, España.
- C.A.R.T.A 1964. Informe Geológico de la Provincia de Misiones. Compañía Argentina Relevamientos Topográficos y Aerofotogramétricos, 172 p. (Inédito).
- Cáceres Alvarado, J.M. 1995. Obtención de fibras de vidrio a partir de rocas volcánicas canarias y su posible aplicación como material aislante y de refuerzo. Tesis Doctoral, Universidad de la Laguna 215 p., España.
- Černý, M., Sucharda, Z., Glogar, P., Strachota, A. and Goliás V. 2012. Basalt and E-glass continuous fibers as reinforcement in thermally stable composites with partially pyrolysed polysiloxane matrix. En West, J.P (ed.). Basalts: Types, Petrology and Uses. Nova Sciences Publishers, Inc., 6: 145-158, New York.
- Ceruti, C. 2013. Homenaje a Jorge y Amílcar Rodríguez: el poblamiento temprano de Entre Ríos, Argentina. Cuadernos del Instituto Nacional de Antropología y Pensamiento Latinoamericano. Series Especiales, 1 (4): 34-47.
- Chebli, G., Mozetic, M.E., Rosello, E.A. y Bühler, M. 1999. Cuencas sedimentarias de la llanura chacopampeana. En Caminos, R. (ed.) Geología Argentina, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Anales 29 (20): 627-644, Buenos Aires.
- Ciccioli, S.E., Garrido, L.B. y Gómez, J.C. 2005. Aspectos mineralógicos y geoquímicos de los basaltos de Eldorado, Provincia de Misiones, orientados a su posible utilización en la industria cerámica. Actas del 16º Congreso Geológico Argentino, La Plata, CD-ROM, Artículo 771, 8 p.

- Ciccioli, S.E., Garrido, L.B., Schalamuk, I.B. 2013a. Adición de finos de basalto en composiciones para cerámica roja. 13° Congreso Internacional en Ciencia y Tecnología de Metalurgia y Materiales 2013. Simposio Internacional sobre Materiales Lignocelulósicos, Iguazú, Misiones. CD-ROM, Artículo T9C.54, 9 p.
- Ciccioli, S.E., Garrido, L.B., Schalamuk, I.B. 2013b. Caracterización de material basáltico de Misiones y su aplicación en cerámica. XI Congreso y Exposición Internacional de la Industria Cerámica, del Vidrio, Refractarios y Suministros, Olavarría, Argentina, Actas: 17-23.
- Ciccioli, S.E., Schalamuk, I.B. 2009. Uso ornamental de basaltos de la Provincia de Misiones, Argentina. Caracterización básica y ensayos tecnológicos. En R. Bruno y S. Focaccia (eds.). *Formazione Avanzata nel Settore delle Rocce Ornamentali e delle Geolaborazioni. Formação Avancada no Setor das Rochas Ornamentais e do Geoprocessamento*: 254-265, Bologna, Italia.
- Comisión Sitios de Interés Geológico de la República Argentina 2008. Sitios de Interés Geológico de la República Argentina. CSIGA (ed.) Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino, Anales 46 (1): 446 p., Buenos Aires.
- Cortelezzi, C., Roellig, F., Ametrano, S. y Iasi, R. 1987. Estudio mineralógico – químico de una chabasita de la Provincia de Misiones – República Argentina. Actas del 10 Congreso Geológico Argentino, San Miguel de Tucumán, (2): 241-244.
- Dalinkevich, A.A., Gumargalieva, K.Z., Marakhovsky, S.S. and Soukhanov, A.V. 2012. Modern basalt materials and basalt fiber based polymeric composites. En West, J.P (ed.). *Basalts: Types, Petrology and Uses*. Nova Sciences Publishers, Inc., 7: 159-177, New York.
- De Ángel, C., Paviolo, A., Di Blanco, Y., Di Bitetti, M. 2008. Guía de huellas de los mamíferos de Misiones y otras áreas del Subtrópico de Argentina. Ediciones del Subtrópico, 118 p., Salta.
- De la Fuente, C., Queralt, I. y Martínez, S. 1990. Yacimientos basálticos de Lanzarote y de El Hierro. Posibles aplicaciones en la industria vitrocerámica y petrórgica. En Rincón, J.M, *Ciencia y Tecnología de los Materiales Cerámicos y Vítreos España '89*. Sociedad Española de Cerámica y Vidrio y Faenza Editrice Ibérica S.L, 4.1: 63-70.
- De Maio, M.B., Constante, M., Galván, L., Juárez, P., Pucciarelli, D., 2000. Piedras ornamentales Argentina 2000. Instituto de Tecnología Minera – Servicio Geológico Minero Argentino, Subsecretaría de Energía y Minería. Catálogo en formato CD-ROM interactivo.
- Di Bitetti, M.S, Placci, G. y Dietz, L.A. 2003. Una visión de Biodiversidad para la Ecoregión del Bosque Atlántico del Alto Paraná. Diseño de un paisaje para la Conservación de la Biodiversidad y prioridades para las acciones de conservación. Word Wildlife Fund, 154 p., Washington, D.C.

- Dirección Nacional de Vialidad 1965a. Límite líquido. Normas de Ensayo 1° Distrito Buenos Aires, Norma VN E2-65, 6-11 p.
- Dirección Nacional de Vialidad 1965b. Límite plástico, índice de plasticidad. Normas de Ensayo 1° Distrito Buenos Aires, Norma VN-E3-65, 12-14 p.
- Dondi, M., Fabbri, B. and Guarini, G. 1998. Grain size distribution of Italian raw materials for building clay products; a reappraisal of Winkler diagram. *Clay Minerals*, 33 (3): 435-442.
- Durán, A. 2002. Límites físicos, químicos y tecnológicos en el diseño y producción de esmaltes cerámicos. En Durán, A. (ed.). *Introducción a los esmaltes cerámicos*. CYTED y Faenza Editrice: 207-224, España.
- Escobar, J.A. 2001. Materiales, su utilización en obras viales. Curso de Laboratorista Vial 2001. Módulo 2. Dirección Provincial de Vialidad, Misiones, 50 p. (Inédito).
- Estrada, D.A. y Espinosa de los Monteros, J. 1980. Ahorro de energía por el empleo de nuevas composiciones cerámicas. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 19 (1): 17-23.
- EUTIT, 2015. <http://www.eutit.com/>. Fecha de acceso: 1/12/2015.
- Fernandes, A.J., Maldaner C.H., Azevedo Sobrinho, J.M., Nogueira Pressinotti, M.M., Wahnfried I. 2010. Estratigrafía dos derrames de basaltos da formação Serra Geral (Riberão Preto – SP) basada na geología física, petrografía e geoquímica. *Revista do Instituto de geociências – USP, Série científica*, 10 (2): 73-99, São Paulo.
- Fernández Lima, J.C. y De La Iglesia, H.J. 1963. Informe sobre el mineral de hierro de la Provincia de Misiones. Informe Técnico de la Dirección Nacional de Geología y Minería, 16: 5-14, Buenos Aires.
- Ferrocarriles Argentinos 1975. Especificación FA 7040: Balasto Grado A. Departamento Normalización y Métodos.
- Fodor, R.V. 1987. Low- and high- TiO_2 flood basalts of Southern Brazil: origin from a picritic parentage and a common mantle source. *Earth and Planetary Science Letters* 84: 423-430.
- Fontana, J., Guerra, R., Carabajal, A.L., Soneyro, D., Díaz, J.L. y Pizone J. 2016. Gestión de áridos en obras viales. 17° Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito (Versión 2.7.1) [Aplicación Móvil]. Disponible en: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.flyering.Kronos.XVIIICongresoVialidad&rdid=com.flyering.Kronos.XVIIICongresoVialidad>
- Fourous, A. 1904. Informe sobre máquinas perforadoras, carbón, petróleo y agua en la República Argentina. Reconocimiento geológico del Territorio de Misiones. *Anales del*

- Ministerio de Agricultura de la Nación. Sección Geología, Mineralogía y Minería, 1(1): 180-211, Buenos Aires.
- Frank, H.T. 2008. Gênese e padrões de distribuição de minerais secundários na formação Serra Geral (Bacia do Paraná). Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências, 322p.
- Frank, H.T., Gomes, M.E.B. y Formoso, M.L.L. 2009. Review of the areal extend and the volume of Serra Geral Formation, Paraná Basin, South America. Pesquisas em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 36 (1): 49-57, Porto Alegre, RS, Brasil.
- Frasca, M. H. B. O., 2002. Caracterização tecnológica de rochas ornamentais e de revestimento: estudo por meio de ensaios e análises e das patologias associadas ao uso. 3º Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste: curso de rochas ornamentais para projetos arquitetônicos e urbanísticos. Anais: 11p., Recife - Pernambuco.
- Fueyo Casado, L. 2014. Equipos de trituración y clasificación: tecnología, diseño y aplicación. Primera Edición, ELCO Editores, 258 p., Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
- Gentili, C. y Rimoldi H.J. 1979. Mesopotamia. En Geología Regional Argentina. Segundo Simposio Academia Nacional de Ciencias, 1: 185-223, Córdoba.
- Gómez Orea, D. 1999. Evaluación del impacto ambiental. Un instrumento preventivo para la gestión ambiental. Coedición Ediciones Mundi-Prensa y Editorial Agrícola Española S.A., 701 p., Madrid.
- Gonçalves de Lima, A. 2009. Controle geológico e hidráulico na morfologia do perfil longitudinal em rio sobre rochas vulcânicas básicas da Formação Serra Geral no Estado do Paraná. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Geografia, área de concentração: Utilização de Recursos Naturais, 219p.
- González P.D. 2008. Texturas de los cuerpos ígneos. En Llambías, E.J. 2008. Geología de los cuerpos ígneos. Tercera edición. Asociación Geológica Argentina – Serie B – Didáctica y Complementaria N° 29 e Instituto Superior de Correlación Geológica – Serie Correlación Geológica 15: 171-197, Buenos Aires.
- Gunther, D.F., Correa G.M. y Lysiak, E. 2008. Zonas Agroeconómicas Homogéneas. Misiones. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Estudios socioeconómicos de la sustentabilidad de los sistemas de producción y recursos naturales N° 5, 113 p.
- Hausen, J. 1919. Contribución al estudio de la petrografía del Territorio Nacional de Misiones. Ministerio de Agricultura de la Nación. Dirección General de Minas, Geología e Hidrología, Boletín 21, Serie B (Geología): 1-39, Buenos Aires.

- Hawkesworth, C.J., Gallagher, K., Kelley, S., Mantovani, M.S.M., Peate, D.W., Regelous, M. and Rogers, N.W. 1992. Parana magmatism and the opening of the South Atlantic. In Storey B., Alabaster, A. and Pankhurst, R. (eds.) *Magmatism and the causes of continental break-up*, The Geological Society, Special Publication 68: 221-240, London.
- Hergt, J.M., Peate, D.W. and Hawkesworth, C.J. 1991. The petrogenesis of Mesozoic Gondwana low – Ti flood basalts. *Earth and Planetary Science Letters* 105: 134-148.
- Hevia, R. 2006. *Materias primas no convencionales en cerámica*. Fundación Empremin (LDM Editorial), 1º edición, 80 p., Córdoba.
- Hevia, R. y Boggio, N. 2000. Caracterización de rocas volcánicas de la Provincia de Neuquén. Estudio de aptitud vitrocerámica. 10º Congreso Argentino e Internacional de Cerámica, Vidrio y Refractario. 5º Congreso del MERCOSUR Actas: 163-170, Buenos Aires.
- Hevia, R. y Bustos, M.A. 1991. Esmaltes basálticos, vidriados basálticos. 35º Congreso Brasileiro de Cerámica y 3º Congreso Iberoamericano de Cerámica, Vidrio y Refractario, Actas: 1098-1104.
- Holand, W. and Beall, G.H. 2012. *Glass ceramic technology*. John Wiley & Sons, 2º Ed., 440 p., New Jersey.
- Homberg, E.L. 1887. Viaje a Misiones. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias de Córdoba* 10: 252-288.
- Hon, K. Kauahikaua, J. Denlinger, R. and Mackay, K. 1994. Emplacement and inflation of pahoehoe sheet flows: Observations and measurements of active lava flows on Kilauea Volcano, Hawaii. *Geological Society of America Bulletin* 106: 351-370.
- Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) de la Provincia de Misiones. Disponible en: <http://www.ide.misiones.gov.ar/>. Fecha de acceso: 30/10/2016.
- Instituto Provincial de Estadísticas y Censos 2015. *Gran Atlas de Misiones*. Volumen 1, 430 p., Posadas, Misiones.
- Iñiguez, A.M. 1977. Influencia de los minerales secundarios en el comportamiento geotectónico de los basaltos del río Uruguay. 3º Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Actas 4 33 0-9.
- IRAM 1973. *Materiales refractarios. Métodos de determinación de la porosidad total, porosidad aparente, porosidad cerrada, absorción de agua, densidad aparente en aire y densidad aparente en agua*. Catálogo de Normas IRAM. Norma 12510. Instituto de Normalización y Certificación, 11 p., www.iram.org.ar.
- IRAM 1982. *Rocas basálticas. Método de determinación de la estabilidad. Ensayo de inmersión en etanadiol (etilén glicol)*. Catálogo de Normas IRAM. Norma 1519. Instituto de Normalización y Certificación, 6 p., www.iram.org.ar.

- IRAM 1985. Agregados. Método de ensayo de durabilidad por ataque con sulfato de sodio. Catálogo de Normas IRAM. Norma 1525. Instituto de Normalización y Certificación, 15 p., www.iram.org.ar.
- IRAM 1990. Materiales refractarios. Método para la determinación del cono pirométrico equivalente. Catálogo de Normas IRAM. Norma 12507. Instituto de Normalización y Certificación, 15 p., www.iram.org.ar.
- IRAM 1992. Reacción álcali-agregado. Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método de la barra de mortero. Catálogo de Normas IRAM. Norma 1637. Instituto de Normalización y Certificación, 18 p., www.iram.org.ar.
- IRAM 1996. Agregados. Método de determinación del índice de lajosidad. Catálogo de Normas IRAM. Norma 1687-1. Instituto de Normalización y Certificación, 12 p., www.iram.org.ar.
- IRAM 1996. Cerámicos para revestimientos de pisos y paredes. Determinación de la resistencia química de los cerámicos esmaltados. Catálogo de Normas IRAM. Norma 11836. Instituto de Normalización y Certificación, 12 p., www.iram.org.ar.
- IRAM 1997. Agregados. Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero. Catálogo de Normas IRAM. Norma 1674. Instituto de Normalización y Certificación, 14 p., www.iram.org.ar.
- IRAM 1997. Agregados. Determinación del índice de elongación. Catálogo de Normas IRAM. Norma 1687-2. Instituto de Normalización y Certificación, 12 p., www.iram.org.ar.
- IRAM 2008. Examen petrográfico de agregados para hormigón. Catálogo de Normas IRAM. Norma 1649. Instituto de Normalización y Certificación, 18 p., www.iram.org.ar.
- IRAM 2009. Agregados. Determinación de la resistencia a la fragmentación por el método “Los Ángeles”. Catálogo de Normas IRAM. Norma 1532. Instituto de Normalización y Certificación, 14 p., www.iram.org.ar.
- IRAM 2013. Geotecnia. Métodos para la determinación en rocas de la densidad real, la densidad aparente, la porosidad, la absorción de agua y propiedades relacionadas. Catálogo de Normas IRAM. Norma 10602. Instituto de Normalización y Certificación, 14 p., www.iram.org.ar.
- Iriondo, M.H. y Kröling, D.M. 1997. The tropical loess. Proceedings of the 30th International Geological Congress. VSP Pub., 21: 61-78, Utrecht.
- Iriondo, M.H. y Kröling, D.M. 2008. Cambios ambientales en la cuenca del río Uruguay: desde dos millones de años hasta el Presente. Universidad Nacional del Litoral, Primera edición, 360 p., Santa Fe.

- Iriondo, M.H., Kröling, D.M. y Orfeo O. 1997. La Formación Oberá, un sedimento eólico tropical. *Memorias del 1 Congreso Latinoamericano de Sedimentología*, Sociedad Venezolana de Geólogos, 1: 343-348, Porlamar.
- Irvine T.N. and Baragar W.R.A. 1971. A guide to the chemical classification of the common Volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8: 523-548.
- King, L. 1956. A geomorfología do Brasil Oriental. *Revista de Geografia*, 18 (2): 147-265, Río de Janeiro.
- Kingery, W.D., Bowen, H.K. and Uhlmann, D.R. 1975. *Introduction to Ceramics*. 2° ed. New York.
- Knapik, J.C. y Angelo, A.C. 2007. Pó de basalto e esterco equino na produção de mudas de *Prunus sellowii* Koehne (Rosaceae). *Revista Floresta*, 37 (3): 427-436.
- Kuno, H. 1968. Differentiation of basalt magmas. In Hess H.H. and Poldervaart A. (eds.). *Basalts: The poldervaart treatise in rocks of basaltic composition*. Interscience, 2: 623-688, New York.
- Lagorio, S. y Leal, P.R. 2005a. Caracterización geoquímica de volcanitas toleíticas de la Formación Serra Geral en la provincia de Misiones. *Actas del 16° Congreso Geológico Argentino*, La Plata, CD-ROM, Artículo 548, 6 p.
- Lagorio, S. y Leal, P.R. 2005b. Niveles peperíticos intercalados en los derrames lávicos de Serra Geral, Provincia de Misiones. *Actas del 16° Congreso Geológico Argentino*, La Plata, CD-ROM, Artículo 549, 4 p.
- Lagorio, S.L. 2008. Early Cretaceous alkaline volcanism of the Sierra Chica de Córdoba (Argentina): Mineralogy, geochemistry and petrogenesis. *Journal of South American Earth Sciences* 26 (2): 152-171.
- Lagorio, S.L. y Vizán, H. 2011. El volcanismo de Serra Geral en la Provincia de Misiones: aspectos geoquímicos e interpretación de su génesis en el contexto de la Gran Provincia Ígnea Paraná – Etendeka – Angola. Su relación con el volcanismo alcalino de Córdoba (Argentina). *Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, Geoacta* (online), 36 (1): 27-53.
- Latorre, C.O. y Vattuone de Ponti, M.E. 1985. Apofilita, chabasita y minerales asociados de la cantera Freyer, El Dorado, Provincia de Misiones, Argentina. *Revista de la Asociación Argentina de Mineralogía, Petrografía y Sedimentología*, 16 (1-4): 17-25.
- Latorre, C.O. y Vattuone de Ponti, M.E. 1986. Presencia de cristales de baritina en un basalto de la Provincia de Misiones. *Revista de la Asociación Argentina de Mineralogía, Petrografía y Sedimentología*, 17 (1-4): 7-10.

- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. and Zanettin, B. 1986. A chemical classification of Volcanic rocks based on the total alkali–silica diagram. *Journal of Petrology* 27: 745-750, Oxford.
- Le Maitre, R.W. 2002. *Igneous Rocks. A Classification and Glossary of Terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. 2° Edition.* Cambridge University Press, 236 p., New York.
- Leinz, V. 1949. Contribuição à geologia dos derrames basálticos do sul do Brasil. *Boletim FFCHL-USP. Geologia*, 103 (5): 1-103.
- Leonardos O.H., Fyfe W.S. and Kronberg, B.I. 1976. Rochagem: O método de aumento da fertilidade em solos lixiviados e arenosos. 29º Congresso Brasileiro de Geologia, Anales: 137-145, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- Lista, R. 1883. *El territorio de las Misiones.* Imprenta “La Universidad”, 114 p., Buenos Aires.
- LLambías, E.J. 2008. *Geología de los cuerpos ígneos. Tercera edición.* Asociación Geológica Argentina – Serie B – Didáctica y Complementaria 29 e Instituto Superior de Correlación Geológica – Serie Correlación Geológica 15, 222 p.
- Loponte, D. y Carbonera, M. 2015. *Arqueología Precolonial de Misiones.* En Bauni, V. y Homberg, M.A. (ed.) *Reserva Natural Campo San Juan.* Primera edición. Fundación de Historia Natural Félix de Azara, 11-38., Buenos Aires.
- Lorenz, W. y Gwosdz, W. 2004. Manual para la evaluación geológica-técnica de recursos minerales de construcción. *Geologisches Jahrbuch Sonderhefte Reihe H., Heft SH 17*, 500 p., Hannover.
- Mahoney, J.J. y Coffin, M.F. 1997. *Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism*, *Geophysical Monograph* 100, 438 p.
- Mantovani, M.S.M., Stewart, K., Turner, S., Hawkesworth, C.J. 1994. Duration of Paraná magmatism and implications for the evolution and source regions of continental flood basalts. In *International Symposium on the Physics and Chemistry of the Upper Mantle. Extend abstracts*: 47-48, São Pablo.
- Marengo, H.G. y Net, L.I. 2004. Petrografía y diagénesis de las areniscas mesozoicas de San Ignacio, Misiones. Significado geológico. X Reunión Argentina de Sedimentología, Resúmenes: 101. San Luis.
- Marengo, H.G. y Palma, Y. 2005. Diques y coladas en los basaltos de Serra Geral, área de San Ignacio, Misiones 2005. *Actas del 16º Congreso Geológico Argentino, La Plata, CD-ROM, Artículo 409*, 6p.

- Marengo, H.G., Palma, Y., Tchilinguirían, P., Helms, F., Wolfgang, K. y Roverano, D. 2005. Geología del área de San Ignacio, Provincia de Misiones. Actas del 16° Congreso Geológico Argentino, La Plata, CD-ROM, Artículo 354, 8 p.
- Mari, E.A. 1998. Los materiales cerámicos. Librería y Editorial Alsina, 378 p., Buenos Aires.
- Martinez Manent, M.R. 1989. Esmaltes cerámicos a base de basaltos. Tesis doctoral. Universitat de València.
- Martínez Martínez, J.L y Gutiérrez González, R. 2014. Control y prevención de la calidad del aire. En Fontana Piatti, J., Guerra R., Leggiero, J.A., Patrón Costas, E., Ruggiero, M., Carabajal, A.L., (eds.). Los áridos son mucho más que piedras. 2° Congreso Argentino de Áridos, 1° edición, Cámara de la Piedra de la Provincia de Buenos Aires. Actas 2: 669-675, Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
- Mena, M., Orgeira, M.J. and Lagorio, S. 2006. Paleomagnetism, rock-magnetism and geochemical aspects of early Cretaceous basalts of the Paraná Magmatic Province, Misiones, Argentina. *Earth Planet Space*, 58: 1283-1293.
- Menghin, O. 1957. El poblamiento prehistórico de Misiones. *Anales de Arqueología y Etnología* 12: 19-40.
- Milner, S.C., Roex, A.P. and O'Connor 1995. Age of Mesozoic igneous rocks in northwestern Namibia, and their relationship to continental break-up. *Journal of the Geological Society London*, 152: 97-104.
- Mincato, R.L. 2000. Metalogenia dos elementos do grupo da platina com base na estratigrafia e geoquímica da Província ígnea continental do Paraná. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, 172 p.
- MINEROPAR-Minerais do Paraná SA 2013. O Grupo Serra Geral no Estado do Paraná. Mapeamento geológico das cartas 1:250.000 de Guaíra, Cascavel, Campo Mourão, Foz do Iguaçu, Guaraniaçu, Guarapuava, Pato Branco e Clevelândia. Volumen 1- Texto: 452 p., Curitiba, Brasil.
- Ministerio de Ecología y Recursos Naturales Renovables (MEyRNR). Sistema de Áreas Naturales Protegidas de la Provincia de Misiones. Disponible en: <http://www.ecologia.misiones.gov.ar/ecoweb/index.php/anp-descgen/sistema-de-areas-naturales-protegidas>. Fecha de acceso: 15/10/2016.
- Miyashiro, A. 1974. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *American Journal Science*, 274: 321-355.
- Molinatti, A.C. 2010. Informe Final Componente 2: Análisis de las condiciones actuales del Territorio de la Micro Región. Programa Multisectorial de Preinversión III Préstamo BID 1896//OC-AR “Plan Estratégico de desarrollo y competitividad regional de la zona del Alto Paraná – Provincia de Misiones” Estudio 1.EG.118, 97 p., Eldorado, Misiones.

- Moroz, B.I., Chernyak, I.P. y Luchka, M.K. 1976. The effect of basalt on the sintering tendency of Clay of various chemical mineralogical compositions. *Glass and Ceramics* 33 (8): 505-507.
- Mujica, J.I. 2007. Prospección arqueológica en la cuenca del arroyo Yará, Puerto Esperanza, Misiones, Argentina. Trabajo presentado en el 27° Encuentro de Geohistoria Regional.
- Müller, F. 1996. *Gesteinskunde*, 5 Auflage, 252 S., zahlr. Abb. u. Tab., Ulm (Ebner).
- Naga, S.M and Abou El-Maaly, M.A. 1994. The influence of alkali olivine basalt on the properties of cordierite – based ceramics. *Interceram*, 43 (1): 12-16.
- Newman, A.C. y Brown, G. 1987. The chemical constitution of clays. In: Newman, A.C. (ed.): *Chemistry of clays and clay minerals*. Mineralogical Society, 1-128.
- Paéz Campos R.L. y Portaneri, J.G., 2011. Pasivos ambientales mineros en la Provincia de Misiones. *Revista Temas de Biología y Geología del Noa*, 1-3: 140-153.
- Pasquarè, G., Bistacchi, A., Francalanci, L., Bertotto, G.W., Boari, E., Massironi, M. and Rossotti, A. 2008. Very long pahoehoe inflated basaltic lava flows in the Payenia Volcanic Province (Mendoza y La Pampa, Argentina). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63 (1): 131-149.
- Peate, D.W. 1997. The Paraná–Etendeka Province. In Mahoney, J.J. and Coffin, M.F. (eds.) *Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism*, *Geophysical Monograph* 100: 217-245.
- Peate, D.W., Hawkesworth, C.J., Mantovani, M.S.M., 1992. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. *Bulletin of Volcanology* 55: 119 - 139.
- Peate, D.W., Mantovani, M.S.M., Hawkesworth, C.J. 1988. Geochemical stratigraphy of the Parana continental flood basalts: borehole evidence. *Revista Brasileira de Geociências* 18: 212-221.
- Pereira Da Silva, F.J., Carvalho, A.M.X., Petersen, P. 2015. Rochagem no manejo da fertilidade dos solos: experiências no Centro Sul do Parana e no Planalto Norte Catarinense. *Revista Agriculturas: experiências em agroecologia*, 12 (1): 30-36, Rio de Janeiro. Disponible en: http://issuu.com/aspta/docs/agriculturas_v12_n1_solos_vivos/31?e=4611714/14695715
- Pereyra, F.X. 2012. *Suelos de la Argentina*. Ed. SEGEMAR-AACS-GAEA, *Anales* 50, 178 p., Buenos Aires.
- Perez Arencibia, J.C. 1988. *Aplicaciones cerámicas y petrárgicas de materias primas de las Islas Canarias*. Tesis Doctoral. Universidad de La Laguna, Tenerife.

- Petrini, R., Civetta, L., Piccirillo, E.M., Bellini, G., Comin-Chiaramonti, P. Marques, L.S., Melfi, A.J. 1987. Mantle herogeneity and crustal contamination in the genesis of low – Ti continental flood basalts from the Paraná plateau (Brazil): Sr – Nd isotope and geochemical evidence. *Journal of Petrology* 28: 701-726.
- Piccirillo, E.M. y Melfi, A.J. (eds.) 1988. The Mesozoic flood volcanism of the Paraná basin: petrogenetic and geophysical aspects. Universidade de Sao Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, 600 p., São Paulo.
- Piccirillo, E.M., Bellieni, G., Comin-Chiaramonti, P., Ernesto M., Melfi, A.J., Pacca, I.G. y Ussami, N. 1988a. Significance of the Paraná flood volcanism in the disruption of western Gondwanaland. In Piccirillo, E.M. and Melfi, A.J. (eds.) *The Mesozoic flood volcanism of the Paraná basin: petrogenetic and geophysical aspects*. Universidade de Sao Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico: 285-295, Sao Pablo, Brasil.
- Piccirillo, E.M., Comin-Chiaramonti, P, Bellieni, G, Civetta, L, Marques, L.S., Melfi, A.J., Petrini, R. Raposo, M.I.B. y Stolfa, D. 1988b. Petrogenetic aspects of continental flood basalt-rhyolite suites from the Paraná basin (Brazil). In Piccirillo, E.M. and Melfi, A.J. (eds.) *The Mesozoic flood volcanism of the Paraná basin: petrogenetic and geophysical aspects*. Universidade de Sao Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico: 179-205, Sao Pablo, Brasil.
- Piccirillo, E.M., Comin-Chiaramonti, P, Melfi, A.J., Stolfa, D., Bellieni, G, Marques, L.S., Giaretta. A., Nardy, A.P.R., Pinese, J.P.P., Raposo, M.I.B. y Roisenberg, A. 1988c. Petrochemistry of continental flood basalt – rhyolite suites and related intrusives from the Paraná basin (Brazil). In Piccirillo, E.M. and Melfi, A.J. (eds.) *The Mesozoic flood volcanism of the Paraná basin: petrogenetic and geophysical aspects*. Universidade de Sao Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico: 107-156, São Pablo, Brasil.
- Poklepovic, F. y Silva, R. 2012. Aplicación del ensayo de “Sonnenbrand” a las rocas basálticas: Propuesta de estudio para su normalización en el ámbito nacional. 16º Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, CD-ROM Trabajo 082, 17 p., Córdoba.
- Popolizio, E. 1972. Geomorfología del relieve de plataforma de la Provincia de Misiones y zonas aledañas. *Anales de la Sociedad de Estudios Geográficos*, 15: 17-84, Buenos Aires.
- Poujade, R.A 1995. Mapa arqueológico de la provincia de Misiones. Entidad Binacional Yacyretá, Universidad Nacional de Misiones y Secretaría de Estado de Cultura de la Provincia de Misiones (ed.). Primera reimpresión, Artes Gráficas Zamphirópolis S.A., Cartilla explicativa y Mapa, 34 p., Asunción.
- Queralt Mitjans, I. 1988. Dinámica mineral de los procesos de devitrificación en vidrios basálticos. Tesis Doctoral. Facultad de Geología, Universidad de Barcelona.
- Queralt Mitjans, I., De La Fuente Cullell, Martinez Manet, S. y Bosch Figueroa, J.M. 1983. Mineralogía y composición química de basaltos españoles en relación con sus posibles

- aplicaciones vitrocerámicas. 1º Congreso Iberoamericano de Cerámica, Vidrio y Refractario, Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, Actas 2: 751-758.
- Rebmann, M.S., Coelho, H.P.T. y Salvetti, A.R. 2001. Efeito da adição de filler de basalto em massa cerâmica vermelha. 45º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Actas, 13 p.
- Renne, P.R., Deckart, K., Ernesto, M., Féraud, G. and Piccirillo, E.M. 1996. Age of Ponta Grossa dike swarm (Brazil) and implications to Paraná flood volcanism. *Earth and Planetary Science Letters* 144: 199-212.
- Renne, P.R., Ernesto, M., Pacca, I.G., Coc, R.S., Glen, J.M., Prévot, M. and Perrin, M. 1992. The age of Paraná flood volcanism, rifting of Gondwanaland, and the Jurassic-Cretaceous boundary. *Science* 258: 975-979.
- Ribas Sékula, C. 2011. Características químicas do solo e produção de grandes culturas com rochagem e biofertilizantes. Tesis de Maestría, Programa de Pós-Graduação, Universidade Estadual do Centro-Oeste, UNICENTRO-PR, 52 p., Guarapuava, Brasil.
- Riggi, J.C. y Feliú de Riggi, N.A. 1964. Meteorización de basaltos en Misiones. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 19 (1): 57-70.
- Rimoldi, H.V. 1978. Estudio geológico – geotécnico del Puente Internacional sobre el río Paraná Encarnación – Posadas. Consorcio para el Proyecto del Puente Posadas – Encarnación, Tecnoconsult S.A. Secretaría Vialidad, 12 p. (Inédito).
- Rimoldi, H.V. 1980. Geotecnia del aprovechamiento hidroeléctrico del arroyo Uruguayí. Inconas S.R.L. Ingenieros Consultores Asociados. Ministerio de Economía y Obras Públicas de la Provincia de Misiones, 103 p. (Inédito).
- Rimoldi, H.V., Roellig, F.R. y Sesana, F.L. 1975. Sobre la inestabilidad de los basaltos de Ayuí. Dique Salto Grande. 2º Congreso Iberoamericano de Geología Económica, Actas 6: 73-94, Buenos Aires.
- Rocha-Campos, A.C, Cordani, U.G., Kawashita, K., Sonoki, H.M. y Sonoki, I.K. 1988. Age of the Paraná flood volcanism. In Piccirillo, E.M. and Melfi, A.J. (eds.) *The Mesozoic flood volcanism of the Paraná basin: petrogenetic and geophysical aspects*. Universidade de Sao Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico: 25-45, São Paulo, Brasil.
- Rollinson, H. 1993. *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman Singapore Publishers (Pte) Ltd., 352 p., Printed in Singapore.
- SAGyP, INTA, Proyecto PNUD ARG 85/019 – Área Edafológica, 1989. *Atlas de Suelos de la República Argentina*. Tomo 1, Buenos Aires, 731 p.
- SAGyP, INTA, Proyecto PNUD ARG 85/019 – Área Edafológica, 1989. *Atlas de Suelos de la República Argentina*. Tomo 2, Buenos Aires, 677 p.

- Sallam, E.H., Khalil, A.A., Naga, S.M and Ibrahim, D.M. 1982. China clay – Basalt mixtures. *Trans. J. Br. Ceram. Soc.*, 81: 156-159.
- Schiavon, M.A., Redondo, S.U.A. y Yoshida, I.V.P. 2007. Caracterização térmica e morfológica de fibras continuas de basalto. *Cerâmica* 53: 212-217.
- Schvorer, E.L. 2003. Etnografía de una Feria Franca. Estudio de un proyecto de desarrollo rural con productores familiares. Departamento Eldorado, Misiones, Argentina. Tesis de Maestría en Antropología Social, Facultad de Humanidades y Ciencias Sociales, Universidad Nacional de Misiones, 174 p., (Inédito).
- Self, S., Thordarson, T. y Keszthelyi, L. 1997. Emplacement of Continental Flood Basalt Lava Flows. In Mahoney, J.J. and Coffin, M.F. (eds.) *Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism*, *Geophysical Monograph* 100: 381-410.
- Shaw, H.R. and Swanson, D.A. 1970. Eruption and flow rates of flood basalts. In Gilmour, E.H. and Stradling, D. (eds.) *Proceedings of the Second Columbia River Basalt Symposium*, Cheney, Eastern Washington State College Press: 271-299.
- Singha, K. 2012. A short Review on basalt fiber. *International Journal of Textile Science*, 1 (4): 19-28.
- Somenson, M. 2014. Planificación para la restauración ambiental de canteras viales en desuso. *Guía Metodológica*. Dirección Nacional de Vialidad, 107 p.
- Sosa L.A.R. y Arellano, D. 2010. Diagnóstico del Medio Social. En *Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Ruta Provincial N° 15*, Provincia de Misiones, 73-108 p. (Inédito).
- Stappenbeck, R. 1914. Resultados geológicos de algunas perforaciones hechas en las provincias orientales de la República Argentina. Ministerio de Agricultura de la Nación, *Boletín* 16 (4), Buenos Aires.
- Stefañuk, M. A. 1991. Evolución de la cartografía de Misiones. Ediciones Montoya, 235p., Posadas.
- Stein, V. 1986. Naturwerksteine. In Bender, F. (ed.) *Augewandte Geowissenschaften*. Bd. IV. Untersuchungsmethoden für Metall- und Nichtmetallrohstoffe, Kernenergierohstoffe, feste Brennstoffe und bituminöse Gesteine, 191-192, 1 Tab., Stuttgart (Enke).
- Stewart, K.S., Turner, S., Kelley, S., Hawkesworth, C.J., Kirstein, L. and Mantovani, M.S.M. 1996. 3D ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology in the Paraná flood Province. *Earth and Planetary Science Letters* 143: 95-110.
- Streckeisen, A. 1978. International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Classification and nomenclature of Volcanic rocks,

- lamprophyres, carbonatites and melilitite rocks. Recommendations and suggestions. Neues Jahrbuch für Mineralogie. Abhandlungen 143: 1-14, Stuttgart.
- Tcheichvili, L. y Hevia, R. 1982. Cerámica de basalto. 1º Congreso Iberoamericano de Cerámica, Vidrio y Refractario, Actas 1: 295-304.
- Technostone S.P.A. 1989. Búsqueda de Tierras en la Provincia de Misiones, Argentina. Informe de la Primera Etapa (Informe Específico N° 1), 154 p. (Inédito).
- TERMICA SAN LUIS SA, 2016. Home page: <http://www.termicasanluis.com.ar>. Fecha de acceso: 11/01/2016.
- Teruggi, M.E. 1955. Los basaltos tholeiíticos de Misiones. Notas del Museo de la Universidad Nacional de La Plata, Tomo 18, Geología 70: 259-278, La Plata.
- Teruggi, M.E. y Leguizamón, M.A. 1986. Fábrica de rocas ígneas. Serie Geociencias N° 2, Ediciones Argentea, 82 p. Buenos Aires.
- Theodoro, S.H.C. and Leonardos, O.H. 2006. The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 78 (4): 721-730.
- Thiede, D.S. and Vasconcelos, P.M. 2010. Paraná flood basalts: Rapid extrusion hypothesis confirmed by new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ results. Geology, 38 (8): 747-750.
- Thompson, R.N. 1984. Dispatches from the basalt front 1. Experiments. Proceedings Geologists Association, 95: 249-262.
- Turner, F.J. and Verhoogen, J. 1951. Igneous and metamorphic Petrology. Primera edición, McGraw-Hill Co, 602 p., New York.
- Turner, S., Hawkesworth, C.J, Gallagher, K., Stewart, K., Peate, D.W. and Mantovani, M.S.M. 1996. Mantle plumes, flood basalts and thermal models for melt generation beneath continents: assessment of a conductive heating model and application on the Paraná. Journal of Geophysical Research 101: 11503-11518.
- Turner, S.P., Regelous, M., Kelley, S., Hawkesworth, C.J. and Mantovani, M.S.M. 1994. Magmatism and continental break-up in South Atlantic: high precision ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology. Earth and Planetary Science Letters 121: 333-348.
- Ulbrich, H.G.J. y Gomes, C.B. 1981. Alkaline rocks from continental Brazil. Earth and Planetary Science Review. 17: 131-154.
- Unidad de Gestión de Proyectos, Municipalidad de Eldorado Misiones, 2009. Plan de desarrollo económico del Alto Paraná. Departamento Eldorado - Puerto Piray. Documento de Diagnóstico. CD-ROM.
- Vicente-Mingarro, I., Callejas, P., Rincón, J.M., 1990. Caracterización de basaltos canarios como materia prima para la fabricación de fibra de vidrio y materiales vitrocerámicos.

- En Rincón, J.M, Ciencia y Tecnología de los Materiales Cerámicos y Vítreos España '89. Sociedad Española de Cerámica y Vidrio y Faenza Editrice Ibérica S.L, 4.3: 75-78.
- Vicente-Mingarro, I, Callejas, P. y Rincón, J.M. 1993. Materiales vitrocerámicos: El proceso vitrocerámico. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 32 (3): 157-167.
- Vicente-Mingarro, I, Rincón, J.M., Bowles, P., Rawlings, R.D., Rogers, P.S., 1992. Viscosity measurements on glasses obtained from Alkaline Volcanic rocks of the Canarian Islands. Glass Technology, 33 (2): 49-52.
- Vicente-Mingarro, I. 1993. Estudio de los mecanismos de nucleación y cristalización en vidrios obtenidos a partir de rocas basálticas canarias. Tesis Doctoral. Ed. Universidad Complutense de Madrid, 256 p.
- Vizán, H. y Lagorio, S.L. 2011. Modelo geodinámico de los procesos que generaron el volcanismo cretácico de Córdoba (Argentina) y la Gran Provincia Ígnea Paraná, incluyendo el origen y evolución de la “Pluma” Tristán. Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, Geoacta (online), 36 (1): 55-75.
- Waichel, B.L. 2006. Estruturação de derrames e interações lava-sedimento na porção central da Província Basáltica Continental do Paraná. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 108 p.
- Waichel, B.L., Lima, E.F., Lubachesky, R., Sommer, C.A. 2006. Pahoehoe flows from the central Parana Continental Flood Basalts. Bulletin of Volcanology, 68: 599-610.
- Walker, G.L.P. 1991. Structure and origin by injection of lava under surface crust, of tumuli, “lava rises”, “lava rise pits”, and “lava inflation clefts” in Hawaii. Bulletin of Volcanology 53: 546-558.
- Wildner, W., Hartmann, L.A. y Lopes, R.C. 2007. Serra Geral Magmatism in Parana Basin – A new stratigraphic proposal, chemical stratigraphy and geological structures. En Iannuzzi R. y Boardman, D. (eds.). Problems in Western Gondwana Geology. I Workshop “South America - Africa correlations: du Toit revisited”. Extended abstracts: 189-197, Gramado, Rio Grande Do Sul, Brasil.
- Winkler, H.G.F. 1954. Bedeutung der Korngrößenverteilung und des Mineral-bestandes von Tonen für die Herstellung grobkeramischer Erzeugnisse. Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft 31 (10): 337-343.
- Yoder, H.M. and Tilley, C.E. 1962. Origin of basalt magmas: an experimental study of natural and synthetic rock systems. Journal of Petrology 3: 342-532, Oxford.

Universidad Nacional de La Plata
Facultad de Ciencias Naturales y Museo

Mayo de 2017